

CIRAD

Centre de coopération internationale
en recherche agronomique pour le
développement

Université de Montpellier I

Faculté des Sciences Economiques

**Impact des politiques visant à réduire la
consommation brute en eau des systèmes irrigués :
Le cas des puits gérés par des collectifs de
producteurs au Mexique**

Thèse présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Montpellier I

Formation doctorale : Economie du Développement Agricole, Agro-alimentaire
et Rural

Groupe des disciplines **Sciences Economiques** du CNU

Section 05

par **Damien JOURDAIN**

Soutenue publiquement le 11 juin 2004
devant le jury composé de :

Michel BENOIT-CATTIN

Jean-Marie BOISSON

Jean-Marc BOUSSARD

Thierry RIEU

Patrick RIO

Consuelo VARELA ORTEGA

CIRAD

Université Montpellier I

INRA

CEMAGREF

INRA

Universidad Politécnica
de Madrid

Directeur de thèse

Examinateur

Rapporteur

Examinateur

Examinateur

Rapporteur

La Faculté n'entend donner aucune approbation ni improbation aux
opinions émises dans cette thèse ;
ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur

Remerciements

L'exercice de la thèse s'apparente parfois à une longue traversée en solitaire dans une mer houleuse et sous une brume épaisse. Heureusement pour tous, une thèse ne se commet jamais seul, je tiens donc à remercier ici toutes les personnes, qui de près ou de loin ont contribué à me faire avancer dans ce jeu de construction qu'a représenté pour moi le travail présenté ici.

Je tiens en premier lieu à remercier les personnes qui ont permis à ce travail d'exister. En France tout d'abord, Francis Forest en me donnant le feu vert et en me permettant de mélanger travail au CIRAD et travail de thèse. Les professeurs Jean-Marie Boisson et Philippe Lacombe qui m'ont tout d'abord permis de reprendre le DEA après quelques années dans le monde professionnel puis encouragé à continuer vers la thèse. Finalement, à Michel Benoit-Cattin qui a accepté de m'encadrer et de recadrer mes objectifs aux moments clés de l'exercice. Au Mexique ensuite, un remerciement particulier ira à Prabhu Pingali et à Michael Morris qui, au sein du programme Economie du CIMMYT, ont permis et accompagné ce travail.

Je suis également très reconnaissant à ceux qui ont accompagné de près le travail de thèse, car partageant les mêmes terrains et le même projet. Eric Scopel, même s'il est maintenant au Brésil a été le principal moteur de mon affectation au Mexique et m'a initié aux problématiques de cette partie du monde. Bernard Triomphe ensuite, avec qui nous avons amorcé, de manière un peu téméraire sans doute, une « migration » vers les zones irriguées du Guanajuato! Bruno Lidon, ensuite, rencontré en cours de thèse, m'a appris les bases biophysiques de la gestion de l'eau, ce qui m'a certainement permis de voir sous un nouvel angle les décisions des producteurs au sein des périmètres irrigués.

Ensuite, un grand remerciement aux différents stagiaires qui ont également contribué à faire avancer l'investigation empirique : Emilie Barry, Valérie Carrère, Sarah Janaud, Virginet Gillet, Frédéric Goulet, Isabelle Ollivier et ceux qui les ont encadrés depuis la France. Parmi eux un mot particulier pour Guillermo Flichman avec qui j'interagis depuis mon DEA qu'il avait bien voulu co-encadrer et que j'ai retrouvé dans le cadre du stage de Sarah.

Je salue également les autres membres de l'équipe ASOSID, Marco Peñalva, Delphine Bénard, et parmi les techniciens de terrain une petite pensée va pour Marquino et *le poulé*.

J'ai également tiré partie, aux différentes étapes de la thèse, des contacts avec mes collègues (mais néanmoins amis!) du CIRAD. Un salut particulier à François Affholder et Philippe Bonnal avec qui j'ai beaucoup interagi pour la construction de mes premiers modèles bio-économiques. François Bousquet, avec qui nous avons

Remerciements

co-construit une ébauche de système multi-agents. Même si par la suite j'ai viré vers des approches plus classiques, ce travail a été riche d'enseignements pour une première conceptualisation des systèmes irrigués et donc pour affiner ma problématique.

Au Mexique, je remercie également les collègues de l'INIFAP. Jesus-Manuel Arreola a été un acteur clé de la migration du projet vers le Guanajuato, et a participé activement aux premières enquêtes dans la région. Marco Vuelvas a également contribué à améliorer ma compréhension du fonctionnement des systèmes irrigués dans cette zone. De même, au CIMMYT, je dois saluer tout particulièrement Dagoberto Flores qui, par sa connaissance approfondie des terrains, m'a beaucoup appris sur le Mexique.

Je tiens également à remercier tous les agriculteurs mexicains avec qui j'ai pu interagir pour avoir très patiemment joué le jeu des enquêtes et des interviews.

Côté technique de modélisation, je n'aurais certainement pas pu achever le modèle sans l'aide Michael Ferris, qui au travers du courrier électronique a bien voulu analyser les modèles intermédiaires et me donner les éléments pour l'améliorer et le terminer.

Last but not least, un grand coup de chapeau à ma petite famille qui m'a supporté (dans les deux sens du terme !) depuis le début de cette aventure.

Table des matières

I	Des problèmes, une problématique...	1
1	Introduction	3
1.1	Du développement à la gestion de la ressource	4
1.2	L'efficacité d'irrigation peut-elle être améliorée ?	6
1.3	Spécificité des eaux souterraines	7
1.3.1	Une abondance apparente	8
1.3.2	Des avantages uniques	11
1.4	Caractéristiques de la ressource	12
1.4.1	Une ressource naturelle renouvelable ?	12
1.4.2	Un bien économique classique ?	13
1.4.3	Un bien en propriété collective	15
1.5	Historique de la gestion des eaux souterraines au Mexique	17
1.6	La région d'étude	20
1.6.1	Le milieu physique	21
1.6.2	Les eaux souterraines	24
1.6.3	Les puits	28
1.6.4	Le fonctionnement des puits collectifs	30
1.6.4.1	Environnement physique	31
1.6.4.2	Règles internes	36
1.7	Conclusions	38
2	Problématique et orientations théoriques	41
2.1	Contours de la problématique	41
2.1.1	Question initiale	41
2.1.2	Quels impacts ?	43
2.1.2.1	L'efficacité	44
2.1.2.2	La productivité économique partielle de l'eau d'irrigation	45
2.1.2.3	L'efficacité	46
2.1.2.4	L'équité	46
2.2	Quelles théories et quels instruments mobiliser ?	47
2.2.1	Les instruments de gestion de la demande en eau	48
2.2.1.1	La tarification de l'eau	48

TABLE DES MATIÈRES

2.2.1.2	Les quotas	55
2.2.1.3	Les marchés de l'eau	57
2.2.1.4	Conclusions sur les instruments de gestion	58
2.2.2	La gestion des biens en propriété commune	59
2.2.2.1	Introduction	59
2.2.2.2	Modélisation multi-agents	59
2.2.2.3	Théorie des jeux	61
2.2.3	La formation des prix sur les marchés oligopolistiques	62
2.2.4	La modélisation bio-économique	67
2.3	Conclusions	68

II Les puits collectifs et leur modélisation 69

3	Vers la représentation des puits collectifs : bases empiriques	71
3.1	Introduction	71
3.2	Méthodologie	71
3.2.1	Deux échelles imbriquées	71
3.2.2	L'échantillonnage	73
3.2.2.1	Stratification régionale	73
3.2.2.2	Echantillonnage des communautés et des puits gérés par des collectivités	74
3.3	Statistiques des puits visités	76
3.3.1	Critères de taille	76
3.3.2	La valorisation de l'eau : diversification des cultures	79
3.3.3	L'historique des puits	81
3.3.4	Les autres activités des groupes	82
3.3.5	Les règles au sein des groupes	83
3.3.5.1	Distribution de l'eau	83
3.3.5.2	Allocation de l'eau	85
3.3.5.3	Allocation des coûts d'extraction	87
3.4	Lecture synthétique du fonctionnement des puits	90
3.4.1	La pression théorique sur l'eau est forte	91
3.4.1.1	Une réduction forte et « spontanée » des cultures irriguées durant le cycle d'hiver (type 3)	91
3.4.1.2	Le groupe adopte des règles qui contraignent la consommation de chacun des membres du groupe (type 4).	92
3.4.2	La pression théorique sur l'eau est normale ou faible	93
3.4.2.1	Avec absence de flexibilité au sein du tour d'eau (type 2)	93
3.4.2.2	Avec une certaine flexibilité au sein du tour d'eau	95

TABLE DES MATIÈRES

3.5	Statistiques des producteurs au sein des puits collectifs	95
3.6	Les différents types de producteurs	98
3.6.1	Les petits producteurs pluriactifs	98
3.6.2	Les producteurs moyens avec des productions fourra- gères	99
3.6.3	Les producteurs moyens céréaliers	100
3.6.4	Les producteurs « en croissance »	100
3.7	Conclusions	101
4	Interactions stratégiques entre les producteurs : une pre- mière représentation stylisée	103
4.1	Introduction	103
4.2	Les interactions stratégiques induites par les règles de répar- tition des coûts d'extraction et les fonctions tarifaires	105
4.2.1	Un premier exemple simple	105
4.2.1.1	Mise en commun des profits et équilibre efficient	106
4.2.1.2	Païement au prorata des surfaces emblavées et comportement non-coopératif	107
4.2.1.3	Païement au prorata des consommations et comportements non-coopératifs	110
4.2.1.4	Tarification binôme et implication pour les in- teractions stratégiques entre producteurs	110
4.2.2	Effcience d'irrigation endogène	113
4.2.2.1	Modèle coopératif	113
4.2.2.2	Influence du coût de l'électricité sur les déci- sions de production	114
4.2.2.3	Influence du coût du travail sur les décisions	115
4.2.2.4	Païement au prorata des surfaces et compor- tements non-coopératifs	116
4.2.2.5	Influence du coût de l'électricité sur les déci- sions de production	117
4.3	Interactions pour la disponibilité de la ressource et risques de production	118
4.4	Conclusions	120
5	Décisions d'irrigation à la parcelle : quelles options pour le producteur, et quels degrés de liberté	123
5.1	Introduction	123
5.2	Les relations entre consommation en eau et rendements : les modèles utilisés dans la littérature économique	124
5.2.1	Fonctions de production estimées	125
5.2.2	Les modèles de simulation	127
5.2.3	Les modèles de bilan hydrique	127

TABLE DES MATIÈRES

5.2.4	Conclusion	129
5.3	Description de l'irrigation à la raie	130
5.3.1	Pourquoi seulement l'irrigation à la raie	130
5.3.2	Irrigation à la raie : principes de base	131
5.3.3	Simulation de l'irrigation au niveau d'une raie	132
5.3.4	Les critères d'évaluation hydrauliques : premiers éléments quantitatifs d'analyse des pratiques d'irrigation	135
5.3.5	Présentation du concept d' « <i>option d'irrigation</i> »	136
5.3.6	Efficience d'application d'une irrigation en fonction de l'état du milieu	137
5.4	Relations Eau rendement travail	139
5.5	Conclusions	140
6	Le modèle d'exploitation et l'équilibre coopératif	143
6.1	Introduction	143
6.2	Structure du modèle d'exploitation	144
6.2.1	Le processus de décision	144
6.2.2	Structuration de la décision par rapport au risque	145
6.2.3	La prise en compte du risque dans la décision	146
6.2.3.1	Maximisation d'une fonction d'utilité	147
6.2.3.2	Les modèles de type « <i>safety-first</i> »	149
6.2.3.3	Conclusion : choix de représentation du risque	150
6.2.4	Fortune ou revenus transitoires ?	151
6.3	Les éléments de base du modèle d'exploitation	152
6.3.1	Les zones (z)	152
6.3.2	Les cultures (c)	153
6.3.3	Le ménage et sa composition	154
6.3.4	Les états de nature	154
6.4	Les contraintes	154
6.4.1	Les contraintes de terre	155
6.4.2	L'irrigation et ses contraintes	156
6.4.2.1	Les contraintes de disponibilité en eau	156
6.4.2.2	Les contraintes d'organisation : tour d'eau	159
6.4.3	Les contraintes interagissant avec la migration	160
6.4.3.1	L'impact de la migration sur les systèmes de production	160
6.4.3.2	Les contraintes de travail	161
6.4.3.3	La disponibilité en travail familial	163
6.4.3.4	Les contraintes de financement	166
6.4.3.5	Les contraintes de crédit	169
6.4.3.6	Le coût global et individuel de l'eau d'irrigation	169
6.5	Fonction objectif et prise en compte du risque	171
6.6	Modélisation de l'équilibre coopératif	172

TABLE DES MATIÈRES

6.7	Les données	174
6.7.1	Les prix des produits agricoles	174
6.7.2	Les autres coefficients techniques	176
6.8	Conclusions	178
7	L'équilibre non-coopératif	181
7.1	Introduction	181
7.2	Modélisation MCP	182
7.2.1	Formulation en inégalités variationnelles	182
7.2.2	Conditions de Karush-Kuhn-Tucker (KKT)	184
7.2.3	Formulation d'un problème de complémentarité	186
7.2.4	Equilibre non-coopératif et complémentarité mixte	187
7.3	Application au puits collectif	189
7.3.1	Présentation générale	189
7.3.2	Le modèle de puits non-coopératif	190
7.4	Conclusions	197
III	Simulations et analyse des instruments	199
8	Analyse des instruments au niveau des puits collectifs	203
8.1	Introduction	203
8.2	Les groupes	204
8.3	La situation de base : l'équilibre non-coopératif	205
8.4	Les gains potentiels de la coopération	206
8.4.1	En termes de consommation en eau	206
8.4.1.1	La consommation du groupe	206
8.4.1.2	Les consommations individuelles	207
8.4.2	En termes de revenus agricoles des producteurs	208
8.4.2.1	Impact sur le revenu du groupe	208
8.4.2.2	Répartition du coût de la non-coopération	208
8.4.3	Les instruments de la coopération	210
8.4.3.1	Le changement de tarification interne	210
8.4.3.2	Les quotas internes	211
8.4.4	Evaluation intermédiaire de l'impact des règles collectives	212
8.5	La tarification électrique	213
8.5.1	Courbe de demande en eau des systèmes irrigués	213
8.5.2	Les demandes individuelles	220
8.5.3	Effets sur les revenus agricoles agrégés	224
8.5.4	Effet sur la productivité partielle de l'eau	227
8.6	Changements de type de tarification	228
8.6.1	La tarification par paliers	229
8.6.1.1	Effets directs	229

TABLE DES MATIÈRES

8.6.1.2	Application pratique	231
8.6.2	La tarification uniforme avec remise fixe	232
8.6.2.1	Effets directs de la tarification	232
8.6.2.2	Un instrument de transfert ?	234
8.6.2.3	Application pratique et dangers potentiels ?	235
8.7	Les quotas électriques	235
8.7.1	Effets sur la consommation en eau	237
8.7.2	Effets sur les revenus	239
8.7.3	Effets sur la productivité partielle de l'eau	239
8.7.4	Application pratique et dangers potentiels	240
8.8	Promouvoir le changement technique	241
8.8.1	Quelles techniques ?	241
8.8.2	Introduction des techniques dans notre modèle	243
8.8.3	Effet du changement technique seul	244
8.8.4	Interactions entre changement technique et tarification électrique	244
8.8.4.1	Courbes de demande en eau	244
8.8.4.2	Effets sur les revenus	245
8.8.5	Conclusion sur le changement technique	248
8.9	Conclusions	249
9	Récapitulatif sur les instruments et premiers éléments d'une analyse agrégée	251
9.1	Introduction	251
9.2	Récapitulatif des effets des instruments	252
9.2.1	Aucun des instruments pris individuellement n'est sa- tisfaisant	252
9.2.2	Travail institutionnel et changement technique	255
9.2.3	Vers une synergie entre les instruments ?	259
9.3	Agrégation au niveau d'un aquifère : premiers éléments numé- riques	262
9.4	Conclusion : encore quelques écueils de taille	267
10	Conclusion générale	271
	Références bibliographiques	281
	Annexes	296
A	Analyse multi-variée des données recueillies sur les puits col- lectifs	296
A.1	Méthode d'analyse	296

TABLE DES MATIÈRES

A.2 Les variables retenues	296
A.3 L'analyse des correspondances multiple	297
A.4 La classification	301
B Analyse multi-variée des données recueillies sur les systèmes de production	306
B.1 Les données	306
B.2 L'analyse des correspondances multiples	308
B.3 La classification	313
C Guide d'enquête pour les puits collectifs	319
D Modèle d'une tactique d'irrigation	324
E Modèle de pilotage des irrigations	327
F Commodités agricoles et coefficients associés	333
G Génération de variables aléatoires corrélées	338

Table des figures

1.1	Distribution inégale de la pluviométrie au Mexique	9
1.2	Distribution des terres agricoles au Mexique	9
1.3	Répartition de la population au Mexique	10
1.4	Evolution du nombre d'aquifères surexploités au Mexique (Comision Nacional del Agua, 1999)	10
1.5	Répartition spatiale des aquifères surexploités au Mexique	11
1.6	Evolution des superficies cérésières dans l'Etat de Guanajuato	22
1.7	Evolution des superficies fourragères et horticoles dans l'Etat de Guanajuato	23
1.8	Répartition des superficies (année 1999)	23
1.9	Etat de Guanajuato : élévations et emplacement des districts d'irrigation	24
1.10	Niveaux statiques des aquifères dans l'Etat de Guanajuato (CEAG, 2003)	25
1.11	Evolution du niveau statique de l'aquifère de Celaya (1975-1999) (Banco Mundial, 1999)	27
1.12	Coupe géologique de l'aquifère de Penjamo-Abasolo (CEAG, 2000)	27
1.13	Principales zones d'extraction des eaux souterraines (CEAG, 2003)	29
1.14	Localisation des puits profonds pour l'aquifère de Penjamo-Abasolo	29
1.15	Evolution des tarifs électrique pour l'irrigation (Prix constants 1994)	30
1.16	Infrastructure des puits : la pompe et le forage (Source : Programa de Asistencia en Riego)	32
1.17	Un exemple d'infrastructure simple de puits collectifs	33
1.18	Un exemple d'infrastructure plus complexe de puits collectifs	34
1.19	Infrastructure des puits : bouches d'eau à l'entrée de la parcelle (Photo : PAR)	35
1.20	Irrigation à la raie avec tubes à vannettes	36
1.21	Irrigation à la raie sans tubes à vannettes	37

TABLE DES FIGURES

2.1	Un exemple de tarification par blocs : structure tarifaire de la ville de La Paz (Bolivie)	50
2.2	Tarification de l'eau : le cas de plusieurs producteurs.	51
2.3	Processus itératif de recherche de l'équilibre de marché	64
3.1	Représentation schématique d'un puits coopératif.	72
3.2	Zonage agro-écologique de l'Etat de Guanajuato.	73
3.3	Zones d'échantillonnage.	74
3.4	Echantillonnage des systèmes observés	75
3.5	Histogramme des coefficients de variation de taille	78
3.6	Histogramme des revenus générés par les puits par unité de débit (Pesos / $l \cdot s^{-1}$	80
3.7	Une typologie du fonctionnement des groupes de puits (pression faible)	94
3.8	Une typologie du fonctionnement des groupes de puits (pression forte)	94
4.1	Consommation en eau d'un producteur en fonction du prix de l'électricité et du facteur ρ	109
4.2	Impact de la superficie du producteur 2 sur les consommations en eau du producteur 1	112
5.1	Les différentes phases de l'irrigation à la raie	132
5.2	Les composantes de l'efficience d'irrigation	135
5.3	Evolution du rendement net maximum en fonction des conditions de la parcelle	138
5.4	Diagramme UML du modèle intégré	139
5.5	Représentation schématique des interactions entre les trois modèles	140
6.1	Représentation schématique d'un puits coopératif.	172
6.2	Modèle conceptuel d'un puits non-coopératif.	173
6.3	Evolution du prix du blé et de l'orge (Guanajuato 1980-2000).	175
6.4	Evolution du prix du maïs et du sorgho (Guanajuato 1980-2000)	175
7.1	Les différents cas de figure d'une optimisation non-linéaire sous contraintes	184
7.2	Représentation schématique d'un puits non-coopératif.	189
7.3	Modèle de puits non-coopératif.	190
7.4	Modèle de type MCP du puits non-coopératif	191
8.1	Les différents instruments	201
8.2	Comparaison des équilibres coopératif et non-coopératifs en termes de consommations en eau des puits collectifs	206

TABLE DES FIGURES

8.3	Comparaison des équilibres coopératif et non-coopératif en termes de consommations individuelles en eau	208
8.4	Comparaison des équilibres coopératif et non-coopératif en termes de revenus agricoles générés par les puits	209
8.5	Comparaison des équilibres coopératif et non-coopératif en termes de revenus agricoles individuels	209
8.6	Demande en eau pour différents types de quotas internes (groupe 2)	212
8.7	Courbe de demande en eau en fonction du prix de l'électricité (groupe 1a)	214
8.8	Courbe de demande en eau en fonction du prix de l'électricité (groupe 1b)	214
8.9	Courbe de demande en eau en fonction du prix de l'électricité (groupe 2)	215
8.10	Courbe de demande en eau en fonction du prix de l'électricité (groupe 5)	215
8.11	Courbe de demande en eau en fonction du prix de l'électricité (groupe 6)	216
8.12	Evolution des superficies cultivées en hiver en fonction du prix de l'électricité (groupe 1b)	217
8.13	Evolution des superficies cultivées en hiver en fonction du prix de l'électricité (groupe 2)	217
8.14	Demande en eau des petits producteurs au sein du groupe 1b .	221
8.15	Demande en eau des grands producteurs au sein du groupe 1b .	221
8.16	Surconsommation par rapport à une répartition égalitaire (équilibre non-coopératif)	223
8.17	Surconsommation par rapport à une répartition égalitaire (équilibre coopératif)	224
8.18	Impact du prix de l'électricité sur les revenus (données brutes) .	225
8.19	Impact des variations des prix de l'électricité sur les revenus (élasticité)	225
8.20	Effet de la non-coopération sur les revenus des groupes	227
8.21	Productivité partielle de l'eau en fonction des groupes	228
8.22	Courbe de demande avec tarification par paliers (groupe 1a) .	230
8.23	Courbe de demande avec tarification par paliers (groupe 1b) .	230
8.24	Courbe de demande avec tarification par paliers (groupe 2) . .	231
8.25	Effet de la tarification uniforme avec remise sur la consommation (groupe 1b)	233
8.26	Illustration du rétro-transfert de revenu par l'octroi d'une remise fixe	233
8.27	Effet des quotas d'électricité sur la consommation en eau (groupe 2)	237

TABLE DES FIGURES

8.28	Effet des quotas d'électricité sur la consommation en eau (groupe 5)	237
8.29	Effet des quotas d'électricité sur la consommation en eau (groupe 6)	238
8.30	Effet du l'introduction du semis direct sur la courbe de demande (groupe 1b, équilibre coopératif)	246
8.31	Effet du l'introduction du semis direct sur la courbe de demande (groupe 1b, équilibre non coopératif)	246
8.32	Effet du l'introduction du semis direct sur la courbe de demande (groupe 2, équilibre coopératif)	247
8.33	Effet du l'introduction du semis direct sur la courbe de demande (groupe 2, équilibre non coopératif)	247
8.34	Effet du l'introduction du semis direct sur les revenus collectifs (groupe 2, équilibre coopératif)	248
8.35	Introduction du semis direct dans un cadre non-coopératif (groupe 2)	249
9.1	Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes non-coopératifs (groupe 1a)	253
9.2	Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes non-coopératifs (groupe 1b)	253
9.3	Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes non-coopératifs (groupe 2)	254
9.4	Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes non-coopératifs (groupes 5)	255
9.5	Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes non-coopératifs (groupe 6)	256
9.6	Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes coopératifs (groupe 1a)	258
9.7	Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes coopératifs (groupe 1b)	258
9.8	Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes coopératifs (groupe 2)	259
9.9	Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes coopératifs (groupe 5)	260
9.10	Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes coopératifs (groupe 6)	260
9.11	Courbes de demande en eau des différents types de puits	263
9.12	Revenus générés par les puits en fonction des tarifs électriques	264
9.13	Courbes de demande en eau agrégée	264
9.14	Effets différenciés des remises sur les revenus agrégés de chacun des groupes	266

TABLE DES FIGURES

A.1	Représentation graphique des modalités des variables selon les axes 1 et 2	300
A.2	Représentation graphique des modalités des variables selon les axes 1 et 3	300
A.3	Représentation graphique des modalités des variables selon les axes 2 et 3	301
B.1	Représentation graphique des modalités des variables selon les axes 1 et 2	312
B.2	Représentation graphique des modalités des variables selon les axes 2 et 3	312
B.3	Dendrogramme de la classification hiérarchique	314
B.4	Individus en classes représentés dans l'espace des deux premiers axes	315
B.5	Individus en classes représentés dans l'espace des axes 2 et 3	315

Liste des tableaux

1.1	Bilans hydrologiques des aquifères de l'Etat de Guanajuato . .	26
1.2	Evolution du nombre de puits dans l'Etat du Guanajuato . . .	28
3.1	Les statistiques de base sur les membres des puits collectifs . .	96
3.2	Sources de revenus au sein des ménages : répartition des effec- tifs généraux	97
6.1	Résultats des régressions linéaires sur le temps et estimation des prix réels pour l'année 2001	174
6.2	Caractéristiques des prix des denrées agricoles épurées de leur tendance	176
6.3	Coefficients de corrélation entre les prix des différentes denrées agricoles épurées de leurs tendances	177
6.4	Coefficients de corrélation pris en compte pour la génération des prix	177
7.1	Liste des contraintes primales et des variables duales corres- pondantes	192
8.1	Caractéristiques générales des puits simulés	205
8.2	Augmentation de prix nécessaire pour obtenir une réduction de 30% ou 45% de la consommation brute	218
8.3	Réduction de la superficie irriguée durant le cycle d'hiver pour obtenir une réduction de 30 ou 45% de la consommation brute (en %)	219
8.4	Impact sur le revenu (en %) d'une réduction de 30 ou 45% de la consommation brute.	226
8.5	Effets moyens de la non-coopération sur les revenus des groupes	227
8.6	Les différents paliers simulés de la tarification par paliers . . .	229
8.7	Impact des quotas électriques sur les revenus des producteurs .	239
8.8	Variation de la productivité partielle de l'eau suite à la dimi- nution de la disponibilité en électricité de 30%	239
8.9	Effet de l'introduction du semis direct durant le cycle d'hiver sur la consommation en eau	244

LISTE DES TABLEAUX

9.1	Réductions de consommation différenciées entre groupes	265
9.2	Remise nécessaire pour éviter une perte des revenus par type de producteur	265
9.3	Effets différenciés sur les revenus d'une remise moyenne de 190 Pesos/ha/mois	266
A.1	Les variables et leur codification	297
A.2	Valeurs propres et leurs inerties	298
A.3	Les principales contributions à l'axe 1	299
A.4	Les principales contributions à l'axe 2	299
A.5	Les principales contributions à l'axe 3	299
A.6	Statistiques des groupes identifiés à l'aide de la classification .	303
A.7	Statistiques des groupes identifiés à l'aide de la classification (2)	304
A.8	Statistiques des groupes identifiés à l'aide de la classification (3)	305
B.1	Les variables et leur codification	307
B.2	Valeurs propres de l'analyse des correspondances	308
B.3	Les principales contributions à la construction de l'axe 1 . . .	309
B.4	Les principales contributions à la construction de l'axe 1 . . .	310
B.5	Les principales contributions à la construction de l'axe 3 . . .	311
B.6	Historique de la formation des groupes	313
B.7	Statistiques descriptives sur les variables quantitatives pour les groupes identifiés	316
B.8	Statistiques descriptives sur les variables quantitatives pour les groupes identifiés (suite)	317
B.9	Tableau des effectifs pour les variables d'importance relative des sources de revenus	318
F.1	Prix des commodités agricoles (source : CIMMYT, 2002) . . .	333
F.2	Prix des commodités agricoles déflatés	334
F.3	Prix des commodités utilisées par le modèle	335
F.4	Coefficients de corrélations entre les variables prix générées . .	335
F.5	Différentes cultures d'été utilisées dans le modèle	336
F.6	Différentes cultures d'hiver utilisées dans le modèle	337
F.7	Exemples de cultures composites	337

Liste des abbréviations

ALENA	Accord de Libre-Echange Nord Américain
CEAG	Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (Commission de l'Etat de Guanajuato pour l'Eau)
CFE	Comisión Federal de Electricidad (Commission Fédérale pour l'Electricité)
CIMMYT	Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo Centre international d'amélioration du maïs et du blé
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agro- nomique pour le développement
CNA	Comisión Nacional del Agua (Commission Nationale de l'Eau)
COTAS	Consejos Técnicos de Aguas (Comité Techniques de l'eau)
ETM	Evapotranspiration Maximale
ETP	Evapotranspiration Potentielle
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrico- las y Pecuarias Institut national de recherches forestières, agricoles, et animales
ha	Hectare
IWMI	International Water Management Institute
l/s	Litre par seconde (unité de débit)
m ³	mètre cube
MCP	Mixed Complementarity Problem
PROCAMPO	Programa de Apoyo al Campo (Programme d'appui au secteur agricole)
SMA	Système multi-agents
SRH	Secretaría de Recursos Hidráulicos (Ministère des Ressources en Eau)

Première partie

Des problèmes, une problématique...

Chapitre 1

Introduction

Le présent travail s'intéresse à la gestion des eaux souterraines à partir du cas d'une région agricole intensive du centre du Mexique, le *Bajío guanajuatense*. Face à la surexploitation chronique des nappes phréatiques de la région qu'elles ont en partie induites, et à la compétition croissante avec les autres secteurs de la société, les institutions mexicaines cherchent maintenant à gérer la demande en eaux souterraines du secteur agricole. Le terme *gestion* est ici implicitement synonyme d'un objectif réduction de cette demande au nom de la durabilité et d'un ré-équilibre des consommations entre les utilisateurs.

La question qui nous est donc posée est d'anticiper l'impact potentiel sur les systèmes de production agricoles des différents instruments visant à réduire leur consommation en eaux souterraines. En limitant le champ de l'étude aux eaux souterraines, nous nous intéresserons de fait aux petits périmètres irrigués. Parmi ces petits périmètres irrigués, ceux qui retiendront particulièrement notre attention seront les petits périmètres gérés de manière collective par des groupes de producteurs. Dans la suite de ce travail, nous dénommerons ces petits périmètres sous le nom de *puits collectifs*. Même si l'appellation n'est pas forcément la meilleure, elle présente au moins l'avantage d'être courte !

Du fait des objets étudiés, ce travail devra aborder les interactions potentielles entre les politiques économiques basées sur la tarification et les institutions sur lesquelles elles s'appliquent. Enfin, nous aborderons également la question du changement des techniques et des pratiques que ces changements

induiront.

Nous avons scindé cette première partie en deux chapitres de nature différente. Le présent chapitre aura pour objectifs, d'une part, de faire un état de lieux de l'environnement dans lequel s'est effectué le présent travail, et d'autre part, de donner les premiers éléments de positionnement de notre question. Le deuxième chapitre est lui consacré tout entier au développement de notre problématique dans ce contexte.

1.1 Du développement à la gestion de la ressource

Notre cas d'étude est loin d'être isolé. L'augmentation de la demande en eau, due à la croissance démographique et au développement économique, fait apparaître un peu partout sur notre planète, des situations de surexploitation de la ressource en eau, ce qui place sa gestion au centre des préoccupations politiques actuelles.

Les projections récentes montrent que la consommation globale en eau pourrait augmenter de 23% entre 1995 et 2025. La situation serait encore plus problématique pour les pays en développement, où l'on attend une augmentation de la demande de 28% sur la même période (Rosegrant *et al.*, 2002).

Par ailleurs, nous devrions observer une réallocation progressive des grands postes de consommation. On anticipe ainsi une croissance de la demande très importante dans les secteurs non-agricoles : 75% dans le secteur domestique, 42% dans le secteur industriel, contre un taux de croissance de la demande agricole relativement modeste de 4%¹. Ces projections montrent enfin que, dans de nombreuses régions, la disponibilité de l'eau pour l'irrigation sera de plus en plus remise en cause au profit des autres usages : domestique, industriel et environnemental.

La réponse traditionnelle à la croissance de la consommation et de la demande potentielle a été d'augmenter l'offre avec la création de grands projets

¹Attention cependant, du fait de la domination actuelle de l'eau d'irrigation, la croissance de la demande du secteur agricole en *valeur absolue* sera identique à celle des autres secteurs.

hydrauliques (barrages, déviation de grands cours d'eau, mise en exploitation des nappes phréatiques). En ce qui concerne l'agriculture, les Etats ont également été à l'initiative de grands projets de développement de régions agricoles par le biais de l'aménagement de grands périmètres irrigués, ou par la promotion de la petite irrigation. Le Mexique, nous le verrons, n'a pas dérogré à cette règle. Cependant, les nouvelles sources d'eau douce sont de plus en plus chères à exploiter, limitant ainsi le potentiel d'augmentation de l'offre en eau. En Afrique, par exemple, l'investissement dans des projets, grands ou moyens, était estimé à 8.300 US\$/ha (FAO, 1992b). Cependant, les coûts moyens des systèmes d'irrigation en Afrique Sub-Saharienne pourraient atteindre 18.000 US\$/ha si les coûts indirects (routes, déplacement population, etc.) sont inclus (Jones, 1995). La compétition croissante pour l'eau, l'augmentation des coûts de réalisation et de maintenance de telles entreprises, et une meilleure prise en compte des coûts environnementaux rendent donc l'augmentation de l'offre et les aménagements à vocation agricole de moins en moins réalistes.

Face à une exploitation perçue, souvent à juste titre, comme non-soutenable de la ressource en eau, les efforts se focalisent depuis quelques années vers une gestion de la demande en eau. Il faut bien sûr replacer cette évolution dans le contexte plus global d'une réorientation des politiques de développement donnant une importance croissante aux concepts de développement durable (Bruntland, 1987) et de gestion durable des ressources.

Cette transition d'une politique de développement volontariste, d'aucun diraient de la mise en valeur minière des ressources naturelles, vers une gestion de la demande est également à relier aux étapes de développement d'un pays. De la même manière qu'il peut être rationnel pour un producteur d'avoir un comportement minier sur les ressources dont il dispose (Pagiola, 1993), certains auteurs suggèrent qu'il puisse être rationnel pour un pays de puiser dans son stock de ressources naturelles à des fins de développement (Allan, 1996). Cependant, cette phase de développement non-durable peut le conduire, si ce mode se poursuit, à une catastrophe écologique et en retour à des situations de crises économiques. Au contraire, à partir d'un certain niveau, le pays peut continuer son développement sans pour autant accroître ses prélèvements sur la ressource. Une stabilisation des prélèvements peut être obtenue par une réallocation intersectorielle de la ressource, impliquant une contraction de la

demande d'un secteur, généralement le secteur agricole, par le biais d'outils de gestion de la demande en eau. L'étude se place bien dans cette optique : le Mexique cherche à stabiliser la consommation brute en eau par une réduction des consommations du secteur agricole et met en place des instruments de gestion de la demande.

1.2 L'efficacité d'irrigation peut-elle être améliorée ?

Avec 85% de l'eau consommée², c'est à dire non utilisable pour d'autres usages, l'agriculture irriguée est la cible principale des nouveaux instruments mis en place.

L'agriculture irriguée a été accusée d'être peu « efficace » dans son utilisation de l'eau. L'efficacité d'irrigation, définie comme le rapport entre eau déviée et eau réellement utilisée par les plantes, varie beaucoup en fonction des conditions agronomiques et climatiques et des techniques employées. Dans beaucoup de régions cependant, on annonce des efficacités d'irrigation de 40 à 50%, i.e. moins de la moitié de l'eau déviée est donc utilisée par les plantes. C'est également le cas de la région qui nous concerne (CEAG, 1999).

Cependant, ces dix dernières années, les concepts d'efficacité de l'utilisation de l'eau, de pertes réelles en eau et d'utilisation agricole de l'eau ont été revisités avec une attention particulière. Une distinction importante doit être faite entre l'efficacité d'irrigation au niveau d'une parcelle ou d'une exploitation, et celle réalisée au niveau d'un bassin versant (Seckler, 1996 ; Molden *et al.*, 2003). Alors qu'une exploitation peut effectivement n'utiliser que 50% de l'eau qu'elle capte, l'eau rejetée peut être utilisée par d'autres producteurs ou retourner vers les nappes phréatiques. Les efficacités calculées au niveau des bassins sont donc typiquement plus élevées que celles calculées au niveau des exploitations agricoles et les gains d'efficacité espérés sont donc moindres que ceux annoncés avant ces mises au point.

Pour la question qui nous préoccupe cependant, trois remarques impor-

²Rappelons certains faits : en 1998, 18% des terres agricoles étaient irriguées, et celles-ci produisaient 40% de la production agricole. L'eau utilisée pour l'agriculture était de 2.500 km³, ce qui représentait 65% des utilisations de l'eau par l'homme (Gleick, 2000).

tantes doivent être faites. Premièrement, il faut faire la distinction entre des systèmes où la demande est fixe, et celle où la demande est croissante. Dans notre cas, la demande des secteurs non-agricoles est fortement croissante, et les aquifères sont déjà sur-exploités. Donc nous recherchons à réallouer partie de la demande brute vers les autres secteurs, et à réduire la demande agricole. Deuxièmement, la réduction de la consommation brute par l'agriculture apporte certains bénéfices que nous n'évaluerons pas ici, mais qui méritent d'être mentionnés : diminution de la pollution potentielle par les produits chimiques agricoles, réduction du coût d'extraction et de traitement des eaux pour la consommation humaine, meilleur bilan énergétique en évitant les extractions multiples de la ressource eau. Troisièmement, certaines innovations permettent des gains d'efficacité tant au niveau bassin qu'exploitation agricole. Une distinction entre la transpiration des plantes (productive), et l'évaporation (improductive) permet d'entrevoir les options techniques à notre disposition : le semis direct avec couvert végétal, par exemple, réduit l'évaporation et donc les pertes tant au niveau bassin qu'exploitation.

Notre problématique se situera donc bien dans un cadre de réallocation de l'eau entre le secteur agricole et les autres secteurs. On recherchera donc bien à limiter la demande en eau des producteurs.

1.3 Spécificité des eaux souterraines

Nous nous intéresserons dans ce travail plus particulièrement aux eaux souterraines. Comme dans le cas général, leur utilisation a été largement encouragée et aidée par le biais des subsides de l'Etat : subventions ou facilités de crédit pour les forages, diminution des coûts d'extraction par une réduction des tarifs électriques. Cette promotion reposait sur l'abondance apparente de la ressource et sur ses avantages spécifiques. Cependant, ces avantages comparatifs en font aujourd'hui une ressource trop populaire et les problèmes d'épuisement des aquifères est devenu un phénomène commun (Shah *et al.*, 2000).

1.3.1 Une abondance apparente

L'observation rapide des ressources en eaux souterraines montre une certaine abondance. En effet, au niveau de la planète, elles représentent 30% de l'eau douce disponible, soit 10 millions de km³ (Gleick, 2000). Ces réserves peuvent apparaître confortables en regard avec la consommation annuelle des eaux souterraines estimée à 750-850 km³ (Shah *et al.*, 2000). Les statistiques nationales, sauf cas exceptionnels, ne montrent pas non plus d'indices alarmants de surconsommation. Les statistiques AQUASTAT de la FAO montrent ainsi que l'Inde connue pour avoir des problèmes sérieux de surexploitations de ses aquifères n'utilise qu'un tiers de la recharge annuelle (Shah *et al.*, 2000). De même, le Mexique, qui nous intéresse utilise environ 16 km³ d'eaux souterraines, pour une recharge annuelle de l'ordre de 140 km³.

Cependant, les statistiques agrégées cachent bien souvent la coexistence de régions où la ressource est sous-utilisée et de régions où la sur-utilisation de l'eau est frappante. La Chine du sud détient 68% de la recharge en eaux souterraines, 54% de la population totale du pays, mais seulement 36% des terres agricoles et n'utilise donc qu'une petite fraction des ressources disponibles. Inversement, la Chine du Nord ne possède que 32% de la recharge et 64% des terres agricoles, et est confrontée à de sérieux problèmes de surexploitation (Lunzhang, 1994) cité dans (Shah *et al.*, 2000).

La situation du Mexique est sur beaucoup de points très similaire à celle de la Chine. Malgré une balance générale des aquifères plutôt favorable, les données climatiques montrent une répartition très inégale de la pluviométrie, donc de la recharge, avec un gradient nord-sud très marqué (Figure 1.1). Parallèlement, les terres agricoles et les populations sont localisées principalement dans des zones sèches (Figures 1.2 et 1.3). Cette situation conduit à des problèmes de gestion de l'eau des aquifères : le nombre d'aquifères sur-exploités augmente rapidement (Figure 1.4), et un aquifère sur six est aujourd'hui considéré comme sur-exploité (Banco Mundial et Comisión Nacional del Agua, 1999). La situation est d'autant plus alarmante pour les décideurs politiques que les aquifères les plus sur-exploités se situent dans les zones agricoles les plus productives du pays (Figure 1.5).

L'idée générale à ce point est qu'une abondance moyenne des eaux souterraines cache une grande diversité des situations. Localement les problèmes

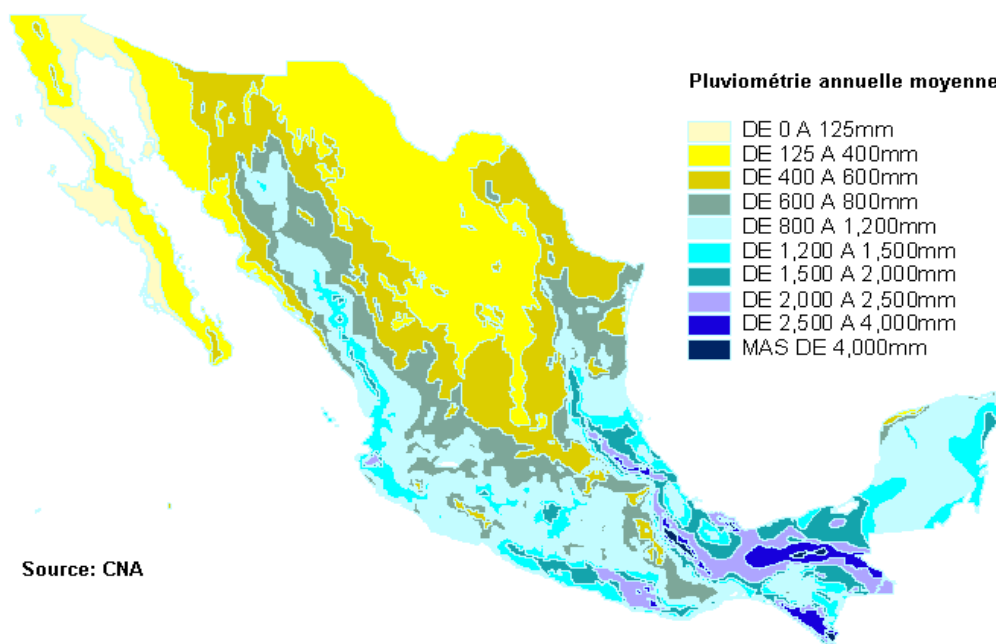


FIG. 1.1 – Distribution inégale de la pluviométrie au Mexique

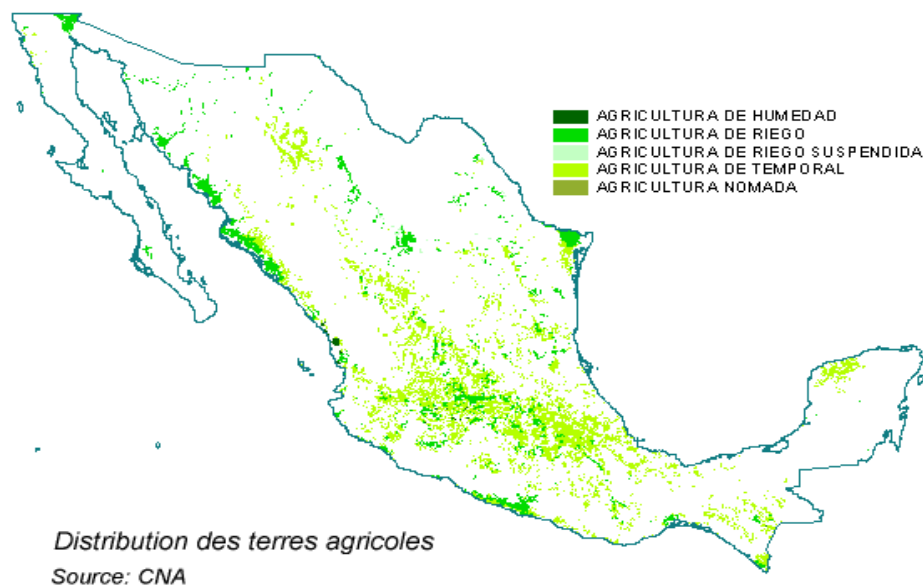


FIG. 1.2 – Distribution des terres agricoles au Mexique

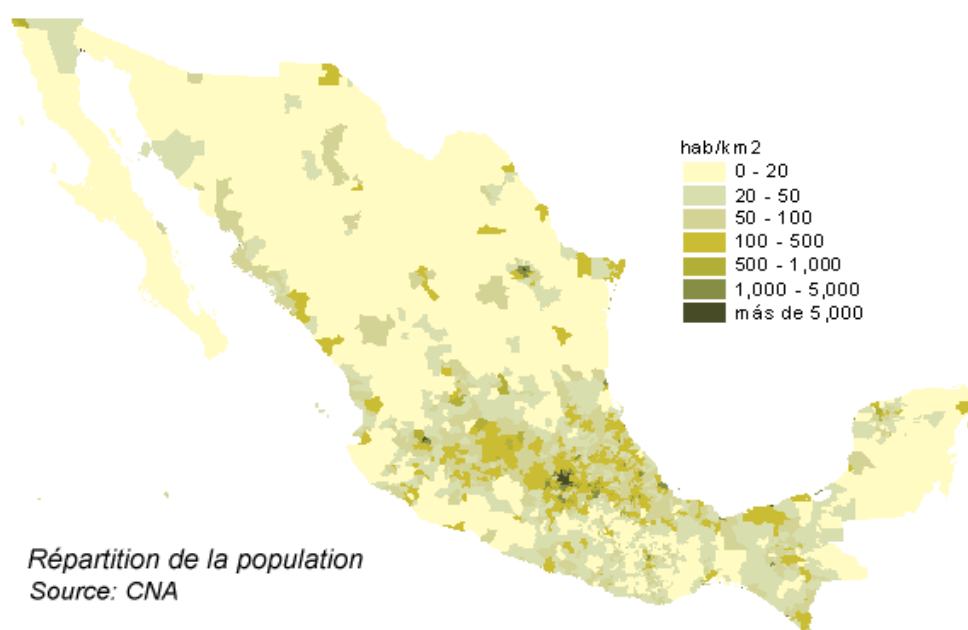


FIG. 1.3 – Répartition de la population au Mexique

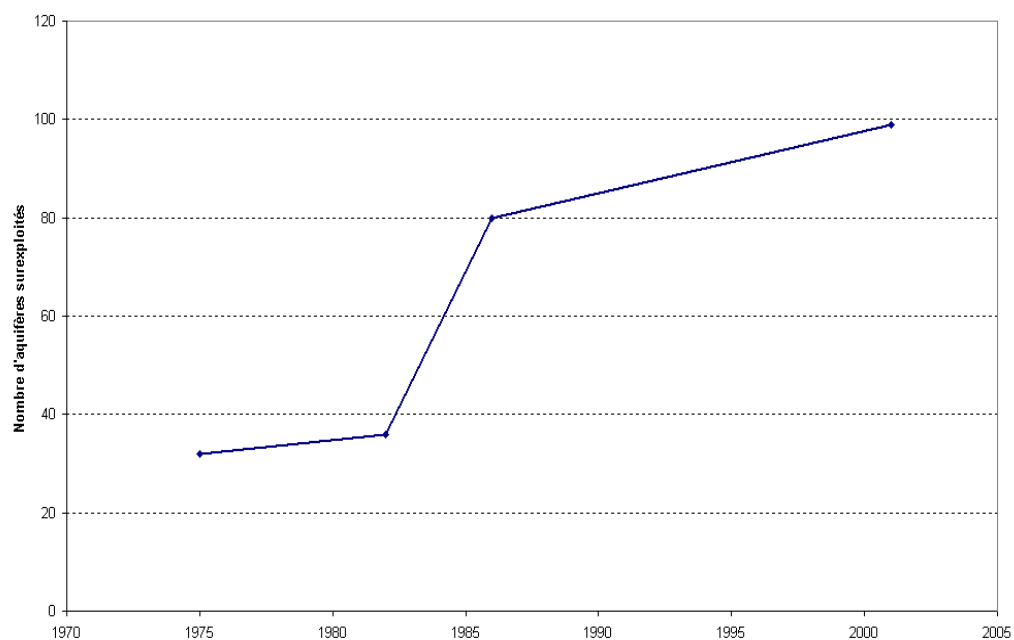


FIG. 1.4 – Evolution du nombre d'aquifères surexploités au Mexique (Comisión Nacional del Agua, 1999)

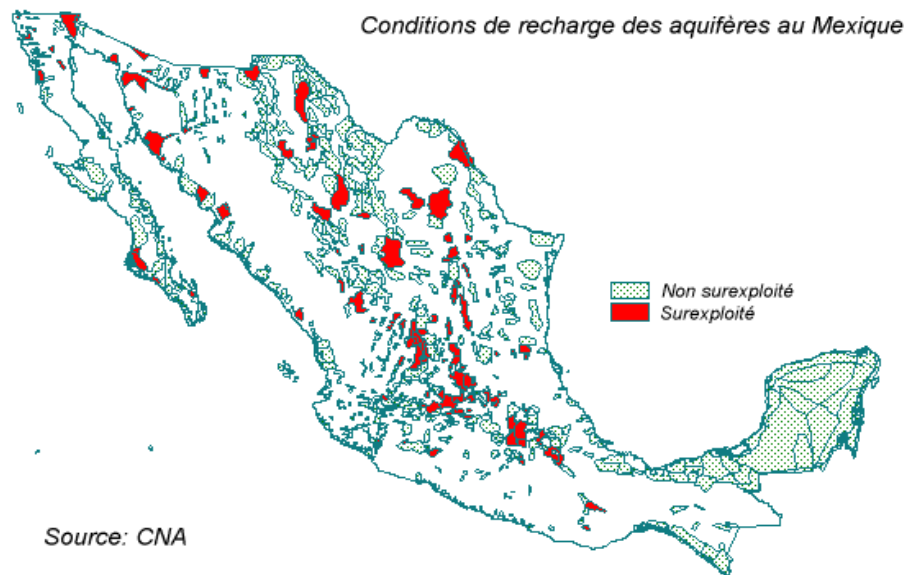


FIG. 1.5 – Répartition spatiale des aquifères surexploités au Mexique

de surexploitation des ressources peuvent être aigus. Nous aborderons donc plus en détail les bilans hydrologiques au niveau de notre zone d'étude (voir section 1.6.2).

1.3.2 Des avantages uniques

Les eaux souterraines présentent des avantages comparatifs importants la rendant attractive tant pour les utilisateurs finaux que pour les décideurs politiques.

Accessibles à un large nombre d'utilisateurs : Les eaux souterraines peuvent être rendues accessibles à un grand nombre d'utilisateurs à un coût relativement modeste en comparaison avec la mise en place d'un grand périmètre irrigué. Elles fournissent donc une eau généralement peu chère à chaque individu car son développement ne repose pas sur des investissements importants. Ceux-ci sont souvent financés et gérés directement par les usagers directs, ce qui diminue également les risques de dérapages budgétaires rencontrés dans certains grands périmètres irrigués.

Meilleure couverture du risque : En comparaison avec les eaux de surface, les eaux souterraines fournissent une meilleure garantie vis-à-vis des sécheresses. En effet, contrairement aux grandes retenues d'eau de surface, elles se rechargent sur un pas de temps beaucoup plus long que les cycles agricoles. Elles peuvent donc tamponner des événements climatiques imprévisibles plus aisément que les eaux de surface (Carter et Howsam, 1994).

Meilleure qualité : La qualité microbiologique des eaux souterraines est souvent supérieure à celle des eaux de surface. En effet, les eaux de surface proviennent souvent de rivières et de fleuves contaminées par les rejets des villes et des industries. C'est particulièrement le cas dans les pays où les infrastructures de traitement des déchets industriels et des eaux usées font défaut. Au Mexique, par exemple, les producteurs de cultures maraîchères destinées à l'exportation ne peuvent utiliser les eaux de surface du fait des contaminations potentielles (métaux lourds notamment).

Meilleure productivité : Les eaux souterraines sont extraites près des points de consommation, ce qui limite considérablement les pertes de conduction. De plus, elles offrent une flexibilité d'utilisation qui ne sera jamais atteinte dans les grands périmètres irrigués. Il en résulte en général une meilleure productivité partielle des eaux souterraines, définie ici comme le ratio entre produit brut (en unités monétaires) et utilisation en eau.

1.4 Caractéristiques de la ressource

Il est maintenant important de mieux caractériser la nature de ressource eau que nous allons étudier. La ressource eau peut rentrer dans plusieurs grilles de classification des ressources. Les délimitations retenues ici conditionneront grandement les accrochages théoriques retenus par la suite.

1.4.1 Une ressource naturelle renouvelable ?

Une ressource naturelle renouvelable est, « dans le domaine biologique, une production spontanée exploitée sans transformation qualitative » (Gillon *et al.*, 2000).

Les ressources renouvelables sont régénérées, parce qu'elles sont recyclées de manière rapide ou car elles sont vivantes et ont une capacité de croissance et de reproduction (écosystèmes, organismes). Le terme *renouvelable* est lié aux vitesses respectives d'exploitation et de restauration de la ressource. Si ces vitesses sont voisines l'une de l'autre, le stock peut rester inchangé ou en tout cas suffisant pour que les flux sortants et les flux entrants puissent s'équilibrer (Conrad, 1999).

L'eau qualifie donc comme une ressource naturelle renouvelable. Cependant, elle a certaines spécificités par rapport aux autres ressources naturelles. Premièrement, dans le cas de l'eau d'un aquifère, le renouvellement de la ressource ne dépend pas du stock mais de paramètres exogènes, pluviométrie, configuration du bassin versant, etc. Deuxièmement, il n'y a pas toujours d'irréversibilité dans la consommation. L'abandon de l'extraction excessive de l'eau d'un aquifère conduit généralement à sa recharge, et donc à la possibilité de l'utiliser de nouveau. Il ne faut cependant pas perdre de vue que les nappes phréatique peuvent s'épuiser de manière irréversible. Pour les nappes proches des côtes, des intrusions salines facilitées par l'épuisement des nappes peuvent au delà d'un certain seuil empêcher irrémédiablement leur utilisation agricole. Dans d'autres configurations, l'extraction continue de l'eau des nappes conduit à des affaissements de terrain rendant impossible les futures recharges.

Nous verrons que notre positionnement par rapport à l'économie des ressources naturelles sera un peu marginal car nous ne préoccuons pas de l'allocation intersectorielle et/ou intergénérationnelle d'une ressource renouvelable. Notre propos est bien d'étudier la réactions des systèmes consommateurs d'eau aux politiques tentant de gérer cette eau (décisions déjà prises). Nous nous situons donc en aval d'une décision de politique émanant des théories de l'économie des ressources naturelles.

1.4.2 Un bien économique classique ?

La proclamation de Dublin, qui mentionne que l'eau doit être traitée comme un bien économique, a été largement utilisée et semble faire l'objet d'un consensus large (International Conference on Water and the Environment, 1992). En effet, il existe de nombreux usages alternatifs à l'eau,

qu'elle soit utilisée directement pour la consommation humaine ou comme bien de consommation intermédiaire pour la production de biens et services. Généralement, bien que cela dépende amplement des zones géographiques, la quantité demandée excède largement la quantité disponible. Il sera suffisant de penser, par exemple, que un milliard de personnes ne disposent pas d'eau potable en quantité suffisante. Ce qui permet de la qualifier comme ressource rare. Finalement, même si la ressource eau a pu parfois apparaître comme une ressource abondante, un coût d'extraction (eau des aquifères), et/ou d'amenée a toujours été nécessaire pour l'obtenir.

L'eau en tant que bien rare et coûteux que l'on peut affecter à différents usages peut donc bien être qualifié de bien économique. Cependant, la déclaration de Dublin était un compromis entre ceux qui voulaient traiter l'eau comme un bien économique classique, c'est à dire en l'allouant entre les différents usages selon des mécanismes de marché compétitifs et ceux qui voulaient traiter l'eau comme un besoin humain vital qui devait essentiellement être extraits des mécanismes de marché. En tant que ressource vitale, tous les hommes ont (devrait avoir ?) un droit à l'eau, en quantité et en qualité suffisante pour leurs besoins vitaux. Les lois et les traités internationaux reconnaissent implicitement, plus souvent qu'explicitement, ce droit comme un droit fondamental de l'homme (Gleick, 1999).

La pondération entre le vital et l'économique est, à nos yeux, plus une question politique qu'économique, nous n'entrerons donc pas dans ce champ. Notre objection est autre. Traiter l'eau comme un bien économique classique supposerait la mise en place de mécanismes de marchés pour permettre les échanges entre utilisateurs. Cependant, les mouvements de l'eau au niveau d'un bassin sont complexes et laissent la place à de nombreux problèmes d'externalités entre usagers et de défaillances de marché. La définition claire de droits de propriété sur l'eau serait alors nécessaire (Perry *et al.*, 1997). On suppose alors que la propriété privée, permettant d'internaliser ces externalités, suffirait à garantir une gestion efficiente des ressources. L'appropriation privée de l'eau n'est cependant pas toujours réalisable, ou seulement à des coûts prohibitifs.

1.4.3 Un bien en propriété collective

On décompose classiquement les biens économiques en fonction des formes de consommations et des difficultés d'exclusion (voir par exemple, Bromley, 1991 ; Ruf, 2002).

Les *biens privés* sont caractérisés par un contrôle de l'accès aisé et une consommation rivale (ce que je consomme ne peut être consommé par un autre : il y a alors destruction par l'usage). A l'opposé, les *biens publics* sont caractérisés par une exclusion difficile, et une consommation non rivale. L'air est souvent pris comme exemple de bien public. L'air est partagé par tous, et la consommation par l'un ne réduit pas la consommation potentielle des autres. Les biens définis par des droits de péage ou *biens clubs* sont les biens dont on peut limiter l'accès, mais dont l'utilisation n'est pas rivale. L'autoroute ou les parcs naturels sont des exemples classiquement retenus.

Les *biens communs en accès libre* sont les biens pour lesquels il est difficile d'exclure l'usage, et pour lesquels la consommation est rivale. Dans ce cas, les coûts de définition des droits de propriété individuels sont importants et empêchent l'appropriation individuelle du bien. Cependant, l'existence de titres de propriété ne suffit pas toujours à considérer les biens comme privés. En effet, l'apparence de propriété ne doit pas faire illusion. L'eau souterraine, par exemple, est souvent explicitement la propriété de l'Etat. Cependant, la difficulté de mettre en place un système de contrôle des consommations et des forages rend cette appropriation inopérante. Dans un tel cas, l'aquifère peut être qualifié de bien commun en accès libre. De même, dans certains pays, les propriétaires terriens sont également propriétaires de l'eau souterraine correspondant à leurs parcelles. Les mouvements des eaux souterraines rendent là encore illusoire le titre de propriété. Il est montré que lorsque les ressources sont en accès libre, c'est-à-dire en l'absence de limitation et de contrôle de l'accès, se met en place une dynamique de surexploitation. Cette dynamique de l'accès libre est connue sous la dénomination de tragédie des communs (Hardin, 1968). Plus récemment, d'autres auteurs ont argumenté en faveur d'un réajustement terminologique en faveur de la tragédie de l'accès libre (Weber, 1992).

L'absence de titre de propriété bien défini n'est cependant pas incompatible avec une appropriation de la ressource par un groupe identifié (Weber,

1995). La définition de bien en *propriété commune* suppose ainsi l'appropriation collective d'un bien (Roemer, 1989). Les membres du groupe peuvent donc interdire l'accès de ce bien aux non-membres (ce qui suppose implicitement que le groupe est « propriétaire au sens large » du bien), mais la consommation entre les membres du groupe reste rivale. Il est alors important de distinguer entre (Baland et Platteau, 1996) :

- Les ressources en propriété commune où une régulation de la consommation de chacun des membres est effectuée par le biais de règles collectives d'accès, d'allocation entre membres et d'investissement pour l'exploitation du bien partagé. On parlera alors de *ressource en propriété commune avec règles collectives*.
- Les ressources pour lesquelles la collectivité n'arrive pas à mettre en place ou à faire respecter ces règles, on parlera alors de *ressource en propriété commune sans règles collectives*. Dans ce cas, les co-propriétaires arrivent à interdire l'accès aux agents extérieurs mais n'arrivent pas à contrôler l'utilisation de chacun des membres du groupe. Le principe d'autorité selon lequel le groupe fonctionne avec un objectif unique n'est donc pas satisfait (Larson et Bromley, 1990). On s'approche alors des caractéristiques des biens communs en accès libre, surtout quand l'effectif du groupe est important.

S'il est relativement difficile de considérer l'eau comme un bien privé, il est également difficile de classer l'eau de manière univoque dans l'une ou l'autre des autres catégories présentées. La réponse dépendra en fait du système qui gère la ressource.

Dans le cas qui nous préoccupe, si les systèmes observés sont les aquifères de la région, l'Etat a su en limiter l'accès (nombre de forages connu et limité), mais le contrôle des consommations individuelles est inopérant. En effet, ni l'Etat, ni les institutions locales mises en place à l'heure actuelle n'ont les moyens d'instaurer des règles collectives d'allocation entre les différents usagers (Marañón Pimentel, 1999). La ressource eau devra alors être considérée comme une ressource en propriété commune non-réglée. L'absence actuelle de régulation, par des institutions ne signifie pas qu'il soit irrémédiablement impossible d'en instaurer. Cependant, la complexité des mouvements de la ressource au sein du bassin, le nombre important d'utilisateurs de la ressources (en moyenne plus de 1.000 puits par aquifère) rendent les pro-

babilités de succès d'un arrangement entre acteurs relativement faibles. Par contre, les instruments économiques classiques, taxes pigouviennes, subventions et quotas sont à la disposition de l'Etat gestionnaire, et permettraient de s'approcher d'une efficience économique pour le groupe (Baland et Platteau, 1996, p. 173). C'est ainsi qu'il faut comprendre les politiques économiques qui seront étudiées ici.

Au contraire, le système puits collectif gère un droit d'extraction d'eau, mesuré en un volume annuel maximal d'extraction et utilisé par ses membres. Le groupe peut limiter le nombre d'utilisateurs ayant accès à la concession du puits et générer de manière autonome des règles internes d'allocation de la ressource. Le système puits collectif gère donc un bien en propriété commune avec règles collectives.

Les systèmes qui seront observés ici sont les puits collectifs. Notre but sera donc d'évaluer *ex-ante*, les changements potentiels de comportement des systèmes puits collectifs face à une nouvelle règle économique visant à réguler l'eau de l'aquifère.

1.5 Historique de la gestion des eaux souterraines au Mexique

« *Contrairement aux politiques sur les eaux superficielles où le processus de contrôle du gouvernement fédéral a été initié depuis plus d'un siècle, la politique sur les eaux souterraines est passée d'une liberté absolue de forer à un contrôle prétendu.* (Sanchez, 1998) »

Au niveau des politiques de gestion de l'eau, le Mexique est surtout connu pour sa politique innovante de 1992, qui a consisté à transférer la gestion des eaux superficielles à usage agricole jusqu'alors aux mains d'une administration centrale forte, à des associations d'utilisateurs (*modulos de riego*). Ce transfert de gestion a eu le mérite de remettre les usagers devant leur responsabilité du maintien des infrastructures d'irrigation jusqu'alors maintenue par l'état. On sera beaucoup plus mesuré sur l'efficacité de telles mesures en termes de consommation en eau (Kloezen *et al.*, 1997 ; Levine et Garces-Restrepo, 1999). L'Etat Mexicain garde cependant la propriété intégrale de la ressource eau, et ne donne que des concessions à ces associations.

Contrairement aux eaux superficielles où l'Etat s'est érigé en propriétaire de la ressource, le statut de bien public des eaux souterraines et leur contrôle par l'octroi de droits d'extraction est très récent. De plus, comme le constate Sanchez, ce contrôle reste très théorique.

Dans la période antérieure à la constitution de 1917, les droits d'eau et du sol sont inséparables. Les propriétaires terriens peuvent exploiter l'eau du sous-sol sans contraintes administratives. A partir de 1917, le gouvernement fédéral se réserve le droit de réglementer l'extraction et l'utilisation de l'eau souterraine ou de créer des zones d'interdiction quand l'exige l'intérêt public. Pendant une grande période, ce droit n'est cependant pas exercé ni par le gouvernement fédéral, ni par les gouvernements locaux. Au contraire, certains états comme le Guanajuato, vont stimuler l'extraction des eaux souterraines en subventionnant les infrastructures d'initiatives privées. Ainsi, la loi de promotion de l'irrigation de 1923 prévoit une réduction de l'impôt foncier sur les propriétés ayant entrepris la construction de nouvelles infrastructures hydrauliques pour l'approvisionnement en eau.

Sous l'effet de la pression d'utilisation de la ressource, la modification de la constitution de 1945 établit l'eau souterraine comme une propriété nationale explicite. En 1946, le *Secretariat aux ressources hydrauliques* (SRH), est créé mais celui-ci gèrera principalement les eaux superficielles.

A partir de 1948, l'Etat installe les premières zones d'interdiction des forages (*zona de veda*). Cela n'empêche pas certains états de fournir des subventions aux propriétaires pour valoriser leur ressource. L'Etat participe d'ailleurs directement ou indirectement, au travers le système bancaire national Banrural, à la construction et à l'équipement de puits. Cette situation perdurera jusqu'au début des années 80.

En 1956, une nouvelle réforme de la constitution établit le principe de domaine de gestion sur les eaux souterraines identique à celui existant sur les eaux superficielles. Toute personne désirant réaliser un nouveau forage doit obtenir l'autorisation explicite de la SRH. On ne constate alors plus de changements majeurs durant une longue période allant jusqu'à la dernière loi de 1992, et son règlement de 1994. Cette période, au niveau du Guanajuato correspond à une phase d'expansion sans précédent du nombre de puits.

La dernière loi marque une volonté plus ferme de contrôler les ressources hydriques nationales. Elle installe la CNA (*Comision Nacional del Agua*

comme l'unique autorité fédérale chargée de la gestion de l'eau en quantité et en qualité. Par ailleurs, elle autorise le commerce des droits d'usages et d'approvisionnement en eaux nationales³.

En ce qui concerne les eaux souterraines, cette prise de contrôle ne doit pas faire illusion. Aux dires même des officiels de la CNA, l'ensemble des droits d'extraction octroyés au niveau des aquifères du Bajío, quand bien-même seraient-ils respectés (!) dépassent la capacité de recharge des aquifères. On voit donc que le contrôle administratif ne sera pas suffisant pour gérer la demande en eau, sauf si une réduction des droits d'extraction était d'actualité.

A partir de 1997, l'Etat mexicain après avoir agi en administrateur décide d'impulser de nouvelles institutions pour la gestion des eaux souterraines, recherchant ainsi la participation plus active des différents utilisateurs et décide la création de *Comites Tecnicos de Aguas Subteraneas* (COTAS). Après diverses péripéties institutionnelles, les premiers COTAS voient le jour en 1999. Les COTAS gérés comme des associations non lucratives agissent principalement sur leur mission d'information auprès des utilisateurs (promotion des techniques nouvelles, etc.). Ces associations sont composées de représentants des différents secteurs de la société : agriculture, industrie et fournisseurs d'eau pour les villes. On notera cependant jusqu'à ce jour les COTAS sont des entités purement consultatives qui n'ont aucun mandat clair pour ce qui est de la résolution des conflits entre les différents types d'utilisateurs et n'ont aucun pouvoir quant à l'imposition de restriction d'extraction. Ce qui limite considérablement leur utilité immédiate. Par ailleurs, la division des responsabilités avec les institutions déjà en place (CNA, Conseil Consultatif de la Gestion des Eaux du Bassin Lerma-Chapala, Associations d'utilisateurs des eaux de surface, Gouvernement de l'Etat de Guanajuato) est loin d'être claire.

Si l'on peut esquisser un bilan de la politique actuelle, l'Etat travaille à réduire la demande par le biais des incitations positives, subventions au changement des techniques d'irrigation par exemple, ou négatives : augmentation des tarifs de l'électricité agricole. Il travaille également au niveau des

³Attention, on ne parlera pas vraiment de marché de l'eau. La loi prévoit la possibilité de ventes d'eau entre les différents modules d'un même district d'irrigation pour les eaux de surface, et d'achat/vente des droits d'extraction octroyé par la CNA.

institutions au niveau des aquifères comme les COTAS, même si l'on peut rester sceptique sur l'effectivité de telles institutions dans leur forme actuelle.

1.6 La région d'étude

Le *Bajío guanajuatense* est une région agricole aux conditions agro-écologiques, en particulier le sol et le climat, très favorables. Cette région est un des pôles de production agricole du Mexique (blé, maïs, sorgho, cultures horticoles). Même s'il ne s'agit pas de détailler ici la diversité des systèmes de production⁴, la production est réalisée majoritairement par des unités de production de taille relativement faibles (entre 3 et 15 ha) appartenant au secteur *ejidal*⁵. Parallèlement, des producteurs de type *petits propriétaires*⁶, cultivent en faire-valoir direct des superficies généralement plus importantes (entre 10 et 200 ha).

Grâce à des investissements publics dans la grande irrigation initiés dans les années 50, une zone d'environ 200.000 hectares peut bénéficier de deux cycles de production par an. Parallèlement, de nombreux agriculteurs de la région ont installé des petites infrastructures d'irrigation utilisant les eaux souterraines : puits profonds et micro-canaux. En 1998, le Bajío comptait environ 14,000 puits à usage agricole. L'installation de ces puits a été l'objet d'investissements des producteurs, individuellement ou en groupe. Il n'existe pas d'estimation précise de la répartition entre les puits individuels et les puits gérés en groupe, mais notre estimation grossière à partir des informations de la Commission Nationale de l'Eau, environ 60% des puits de la région sont gérés collectivement. L'utilisation des eaux de surface et des eaux souterraines n'est, en général, pas le fait des mêmes producteurs, même si des exceptions existent.

⁴Pour plus de détails voir (Barry, 2001 ; Carrère, 2001a ; Jourdain *et al.*, 2001a ; Jourdain *et al.*, 2001b)

⁵Le système ejidal, instauré avec la constitution de 1917, permettait à des groupes organisés de répartir entre ses membres la terre des grandes haciendas. Les membres de l'ejido ou *ejidatarios*, obtenaient l'usufruit de la terre qu'ils pouvaient transmettre à leurs enfants, mais n'en étaient pas propriétaires. Tout *ejidatario* qui ne cultivait pas sa terre devait la retourner à la communauté.

⁶La petite propriété, dans le contexte mexicain, n'est pas synonyme de faibles surfaces, mais caractérisent les unités de production ayant gardé un titre de propriété de leurs terres. Ils pouvaient donc, contrairement aux *ejidatarios*, louer et vendre librement leurs terres.

A l'heure actuelle, en agrégeant eaux souterraines et eaux de surface, l'agriculture irriguée du Bajío guanajuatense représente une superficie d'environ 450.000 hectares. Avec, en moyenne, plus de 80% des extractions, elle est le consommateur principal des eaux souterraines de cette région. Dans la plupart des zones géo-hydrologiques, l'extraction annuelle en eaux souterraines dépasse largement la recharge et on assiste à une descente rapide du niveau des nappes phréatiques et à une diminution de la qualité des eaux extraites (CEAG, 2000).

La descente des nappes phréatiques a des répercussions fâcheuses sur le secteur agricole lui-même par une augmentation des coûts d'extraction, mais aussi sur l'approvisionnement en eau des villes (consommation humaine et industrie). Elle n'est pas « politiquement acceptable ». L'agriculture irriguée dans le Bajío doit donc évoluer vers une agriculture moins consommatrice d'intrants externes.

Cet ajustement demandé aux producteurs agricoles doit nécessairement être remis dans le contexte de l'évolution du secteur agricole mexicain. Le Mexique a engagé, depuis le milieu des années 80, une réorientation complète de sa politique agricole. L'entrée dans l'ALENA⁷, signifie une ouverture des marchés agricoles sur une période de 15 ans, un arrêt des soutiens aux prix des produits agricoles jusqu'alors fortement subventionnés au profit d'une aide forfaitaire au revenu liée à la superficie possédée (PROCAMPO⁸). Enfin, la réforme agraire de 1992 libère le marché de la terre et permet au *ejidatarios* de vendre ou louer leurs terres. Même si cette dernière réforme entérine un phénomène amorcé préalablement à sa promulgation (Bouquet, 1999), elle risque de provoquer, en synergie avec l'ouverture des marchés agricoles, une profonde restructuration du secteur agricole mexicain.

1.6.1 Le milieu physique

La région Bajío est située en grande partie dans l'Etat du Guanajuato. Le Guanajuato est un état situé sur le plateau central du Mexique aux environs

⁷Accord de Libre Echange Nord Américain (comprenant le Canada, les Etats-Unis et le Mexique)

⁸Programa de apoyos al Campo : programme de subventions liées aux superficies cultivées, mis en place depuis 1994, afin de compenser les producteurs pour les pertes de revenus anticipées et leur permettre une adaptation progressive aux nouvelles conditions de marché

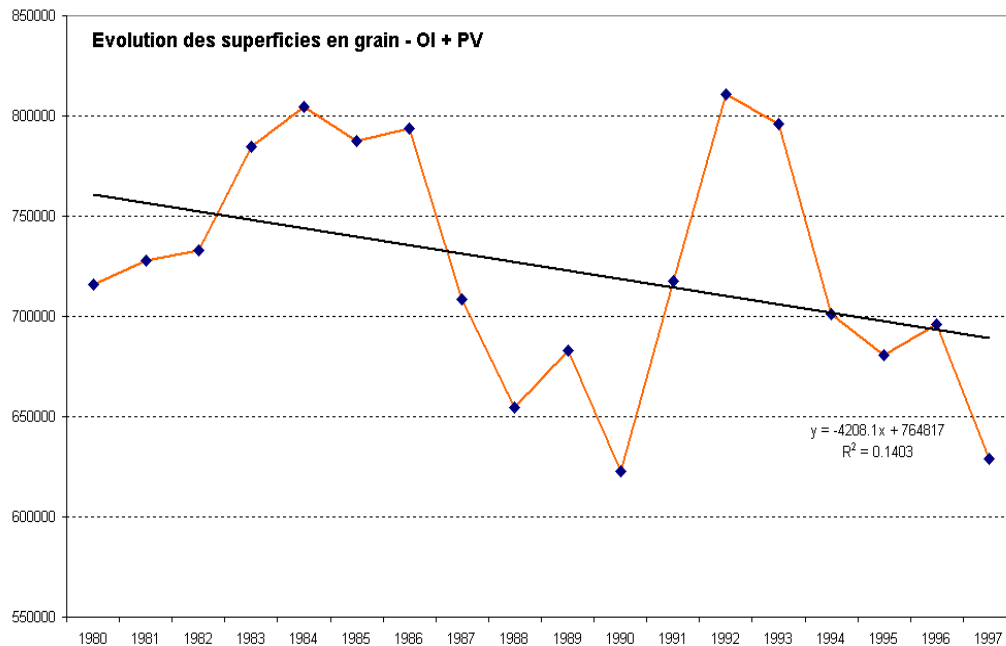


FIG. 1.6 – Evolution des superficies céréalières dans l'Etat de Guanajuato

du 20^{ème} parallèle nord. Les productions agricoles sont réparties sur deux cycles de production. Elles sont essentiellement céréalières : maïs/sorgho durant le cycle d'été correspond à la période où les pluies sont abondantes, blé/orge durant le cycle d'hiver correspond également à une période sèche. Plus récemment, les cultures horticoles ont fait leur apparition dans la zone, mais avec 6% des superficies cultivées, leur ascension fulgurante dans la région n'est le fait que d'une minorité de producteurs (essentiellement petits propriétaires ayant une source d'eau souterraine en propriété individuelle). L'évolution des superficies cultivées est présentée dans les figures 1.6, 1.7 et 1.8.

L'état se divise en deux grands territoires correspondant à deux zones physiographiques contrastées (Figure 1.9). Le Nord de l'état, qui appartient à la zone physiographique *Mesa Central*, est une zone plutôt montagneuse au climat semi-aride (500 mm de pluie annuellement en moyenne). A part le plateaux Nord-Est de l'état où une agriculture intensive à base de maraîchage s'est développée, l'agriculture de cette zone est essentiellement pluviale de subsistance.

Au sud de l'Etat, correspondant à la zone physiographique *Eje Neovolca-*

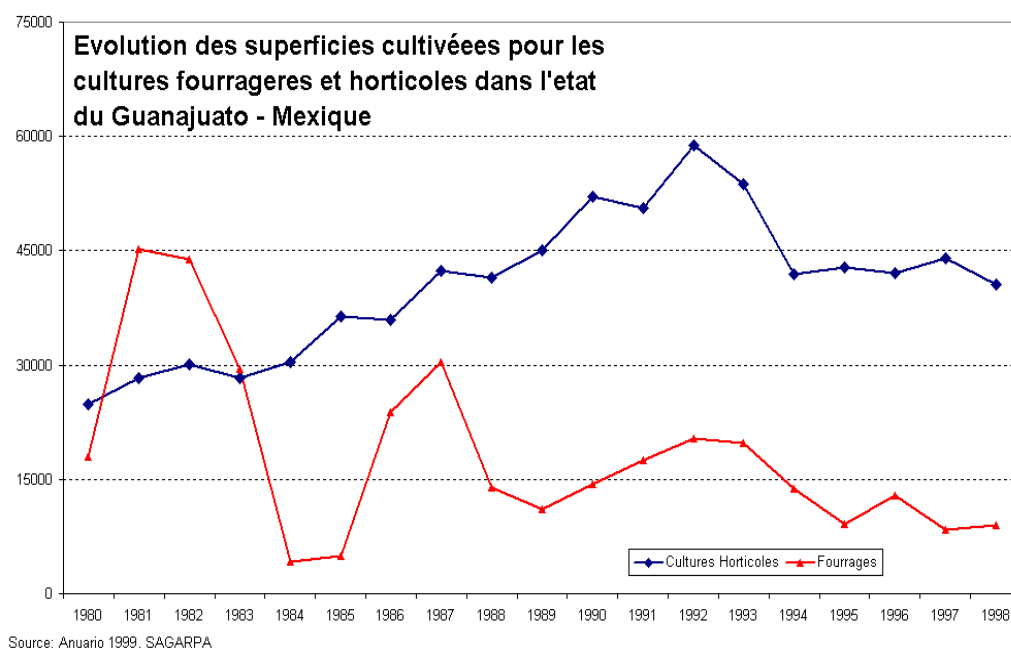


FIG. 1.7 – Evolution des superficies fourragères et horticoles dans l'Etat de Guanajuato

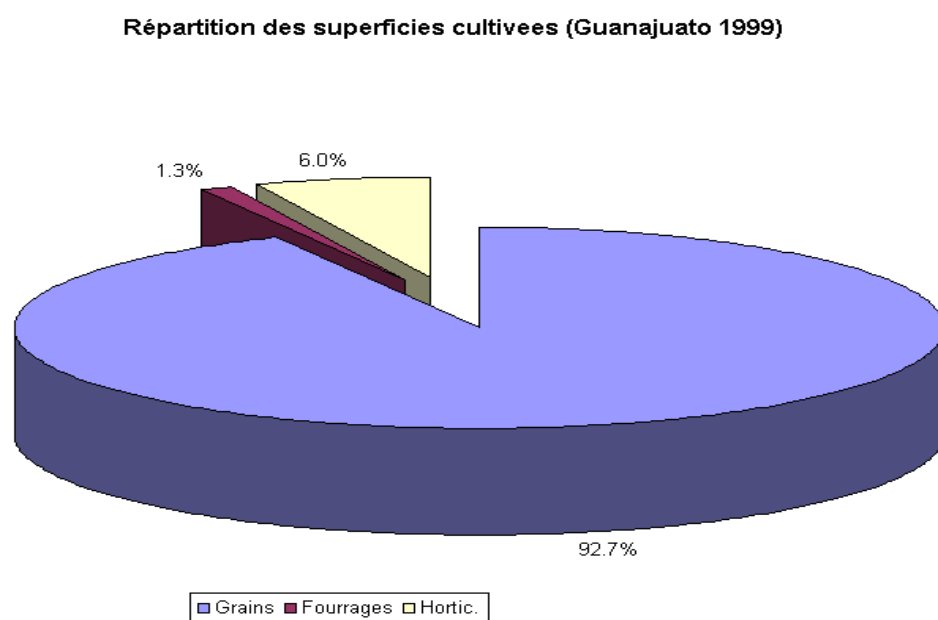


FIG. 1.8 – Répartition des superficies (année 1999)

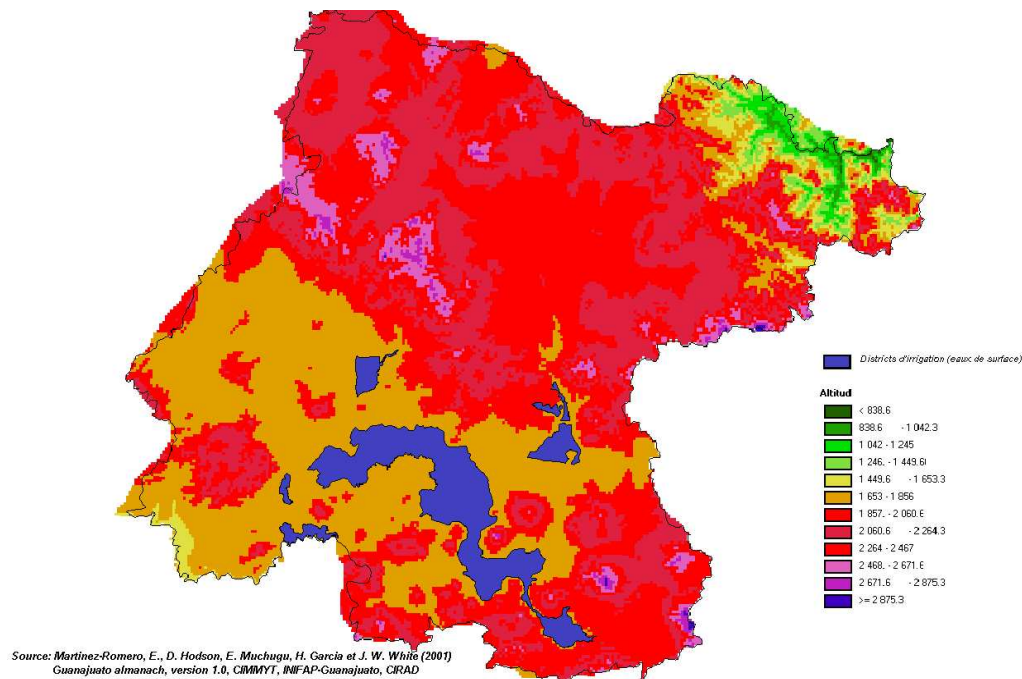


FIG. 1.9 – Etat de Guanajuato : élévations et emplacement des districts d'irrigation

nico, nous avons une zone relativement plane, située à une altitude variant entre 1500 et 1700 mètres, entrecoupée de grands volcans. C'est cette zone qui est connue comme le *Bajío Guanajuatense*. C'est une zone très fertile : les sols sont des vertisols profonds et la pluviométrie y est plus favorable avec des précipitations moyennes de 650 mm annuellement répartis essentiellement durant la période Juin-Octobre. Enfin les producteurs ont dans leur grande majorité accès à l'irrigation, qu'elle soit en provenance des petits périmètres irrigués (eaux souterraines) ou des grands périmètres irrigués (DR 011 et 085).

C'est essentiellement à cette dernière zone que nous nous intéresserons.

1.6.2 Les eaux souterraines

Les eaux souterraines de l'Etat de Guanajuato sont stockées dans 14 aquifères aux caractéristiques variées (Figure 1.10). Dans les années récentes, des études géologiques et hydrologiques poussées ont été conduites, qui nous permettent de connaître avec assez de précision les conditions de chacun de ces aquifères (CEAG, 2000). Ces études montrent notamment que, en 2000,

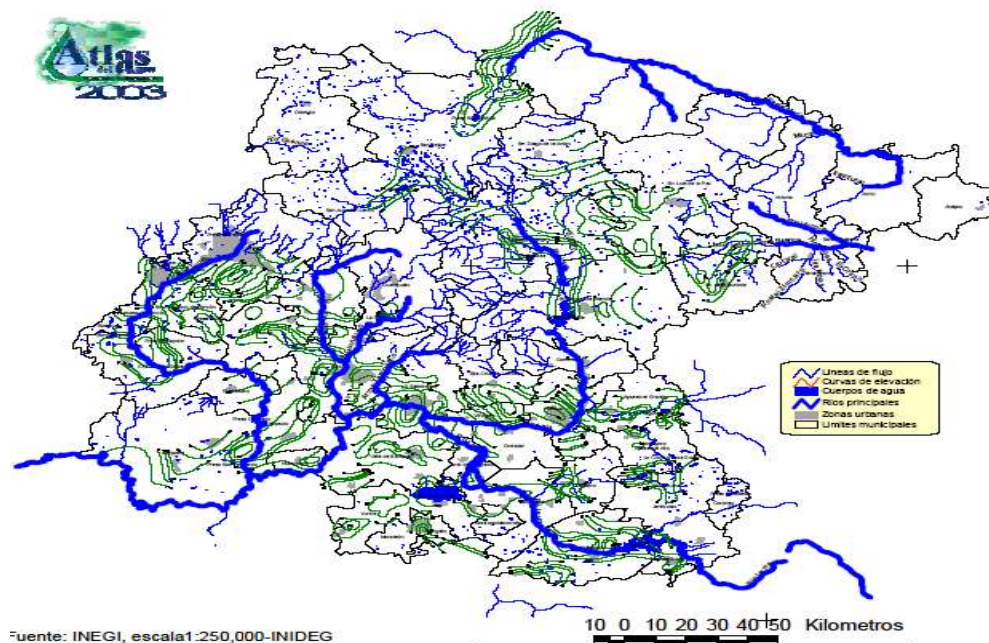


FIG. 1.10 – Niveaux statiques des aquifères dans l'Etat de Guanajuato (CEAG, 2003)

tous les aquifères de l'Etat étaient surexploités (Tableau 1.1).

Comme corollaire, ces bilans hydrologiques montraient également une descente rapide des aquifères de la région (voir par exemple, figure 1.11). Pour certains d'entre eux, ils montrent d'ailleurs la présence de plusieurs niveaux superposés d'aquifères et l'exploitation successive des différents horizons. Par exemple, pour l'aquifère de Pénjamo-Abasolo, on distingue trois horizons de stockage : élevé, moyen et profond (Figure 1.12). A l'heure actuelle, le premier horizon (peu profond) est complètement asséché et le deuxième est en voie d'assèchement. Cela confirme les observations effectuées dans la région où de nombreux producteurs mentionnent une diminution drastique des débits des puits. La réaction de ces producteurs, d'ailleurs conforme à la loi sur l'eau en vigueur, est d'effectuer, quand ils le peuvent, de nouvelles perforations (appelée *reposición*) permettant d'atteindre l'horizon profond. Pour l'année 2000, on recensait environ 100 nouvelles perforations dans cette zone montrant bien la dynamique en cours.

	Entrées (M m3)	Sorties (M m3)	Variations de stock (M m3)	Descente annuelle moyenne des aquifères (m)	Niveau sta- tique en 2000 (m)
Apaseos	174,5	240,4	-65,9	3,5	30-150
Pénjamo -	426,5	503,3	-76,8	3	15-125
Abasolo					
Silao-Romita	316,8	381,1	-64,3	3	50-120
Celaya	431,7	593,0	-161,3	3	40-110
Laguna Seca	176,5	395,0	-218,5	2,5	40-200
Jaral de Ber- rios	128,1	213,8	-85,7	2,5	20-100
Rio Turbio	150,6	191,3	-40,7	2	30-150
Irapuato- Valle	386,7	641,7	-255,0	2	20-100
Acambaro	119,9	162,0	-42,1	2	20-90
Leon	264,3	312,6	-48,3	1,5	50-135
Salvatierra	75,0	109,2	-34,2	1,5	40-80
Ciénega	92,5	124,4	-31,9	1,25	20-150
Prieta - Moro- lón					
Rio Laja - San Felipe	171,2	278,2	-107,0	1,2	50-120
Cuitzeo	27,2	39,7	-12,5	1	10-100
La Cueva	7,0	9,2	-2,2	0,5	40-110
TOTAL	2948,5	4194,8	-1246,3	2,03	
Source : CEAG (2000), Actualizacion del balance subterraneo de los acuiferos de Guanajuato					

TAB. 1.1 – Bilans hydrologiques des aquifères de l'Etat de Guanajuato

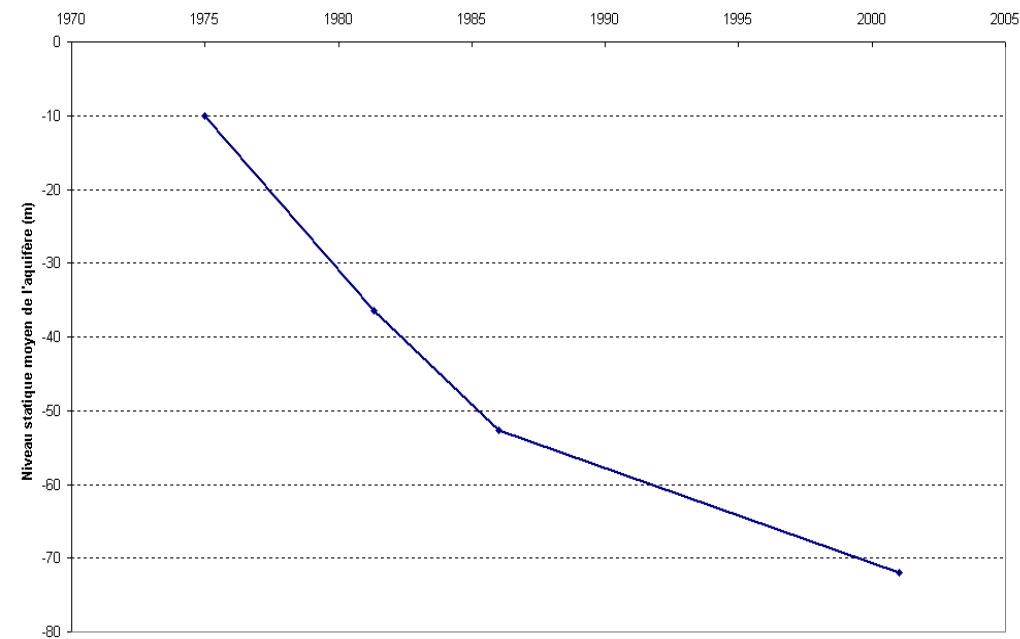


FIG. 1.11 – Evolution du niveau statique de l’aquifère de Celaya (1975-1999) (Banco Mundial, 1999)

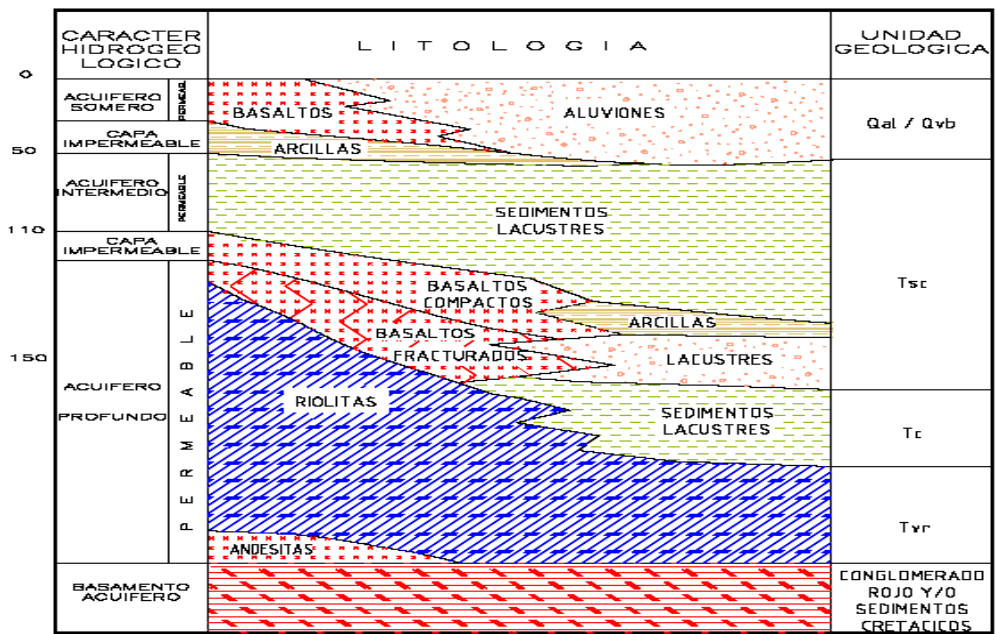


FIG. 1.12 – Coupe géologique de l’aquifère de Penjamo-Abasolo (CEAG, 2000)

1.6.3 Les puits

Le Bajío est une zone qui concentre la densité de puits la plus importante du Mexique, avec environ 17.000 puits recensés officiellement en 1998⁹. Ce nombre impressionnant de puits est le résultat d'une progression constante du nombre de puits depuis les années 60 (Table 1.2).

Les puits fournissent près de 60% de l'eau d'irrigation utilisée par l'agriculture. Le reste étant fourni par les eaux de surface (petites et grandes retenues d'eau).

Toutes les terres n'étant propices à l'agriculture, les puits sont concentrés dans des zones relativement compactes (Figures 1.13 et 1.14). On notera cependant que les puits ne peuvent être théoriquement implantés dans un rayon de 500 m autour d'un puits existant.

Date	1960	1966	1975	1998
Nb. puits	1100	4800	13000	17000
Source : (Guerrero, 1998) cité dans (Gillet et Ollivier, 2002)				

TAB. 1.2 – Evolution du nombre de puits dans l'Etat du Guanajuato

La source d'énergie utilisée pour extraire les eaux profondes a évolué progressivement. Les premiers puits étaient creusés manuellement et les pompes étaient thermiques (diesel). A partir des années 70, on observe cependant une transition massive vers l'utilisation des pompes électriques. L'approvisionnement en électricité des puits est faite par la *Comission Federal de Electricidad*, compagnie publique fédérale de fourniture de l'électricité au Mexique. Le tarif des consommations électriques liées aux extractions d'eau à usage agricole fait l'objet de prix régulé directement par l'Etat. Ceux-ci sont nettement plus bas que pour les autres secteurs.

La tarification est une tarification par blocs en quatre paliers bornés par les seuils 5.000 kWh, 15.000 kWh, et 35.000 kWh¹⁰. Nous disposons d'une série de prix pour les six dernières années. (Figure 1.15). Cette série relativement courte montre cependant deux phases distinctes. Une première phase

⁹Auquel il faudrait ajouter les puits non recensés par la CNA, dont on ignore le nombre exact

¹⁰Pour fixer les idées, un puits ayant une efficience électromécanique de 0.0044 Kw/m³/m, et ayant un débit de 35 l/s, consomme s'il fonctionne de manière continue dans un mois environ 20.000 kWh. Les puits de la région se situent essentiellement sur le deuxième palier de consommation.

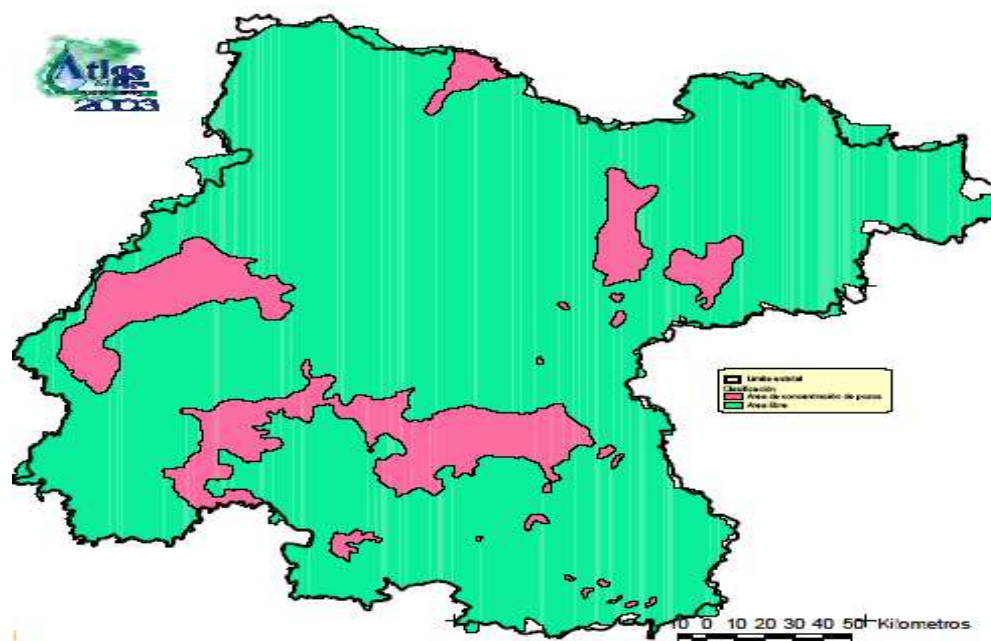


FIG. 1.13 – Principales zones d'extraction des eaux souterraines (CEAG, 2003)

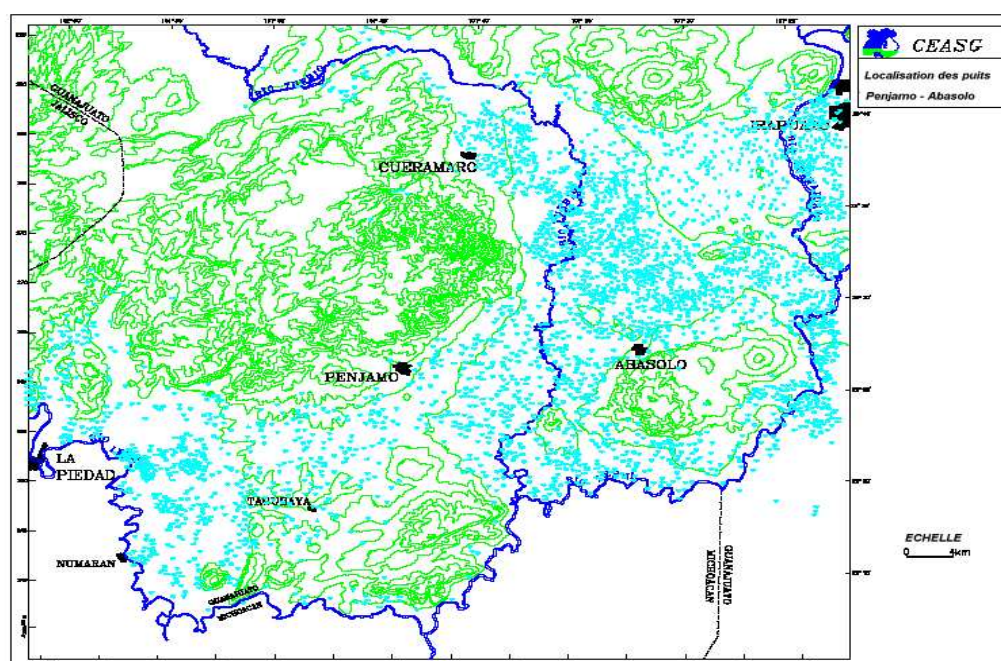


FIG. 1.14 – Localisation des puits profonds pour l'aquifère de Penjamo-Abasolo

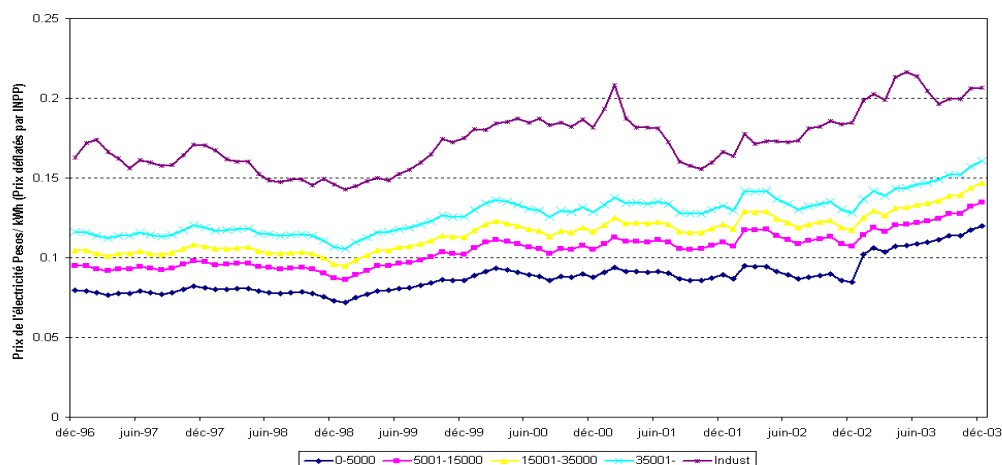


FIG. 1.15 – Evolution des tarifs électrique pour l'irrigation (Prix constants 1994)

(1997-2001) où les prix (en Pesos constants de 94) de l'électricité sont relativement stables (l'augmentation des tarifs se fait au niveau de l'inflation). Une deuxième phase (2002-04) où les prix commencent à augmenter plus vite que l'inflation. A partir de 2002, le gouvernement met en place une politique d'augmentation rapide du prix de l'électricité de l'ordre 1.3% par mois des prix constants : entre décembre 2001 et décembre 2003 les tarifs (en prix réels) de l'électricité agricole ont donc augmenté de 25% en moyenne, sachant que c'est le palier inférieur qui augmente le plus rapidement avec une augmentation de 35% des prix réels en deux ans. On assiste donc à un rattrapage des tarifs agricoles par rapport aux autres tarifs.

Cette augmentation des tarifs, pour importante qu'elle puisse paraître, est-elle de nature à modifier les comportements de production des agriculteurs de la région ? Nous avons pour le moins perçu un mécontentement certain des agriculteurs enquêtés, mais il semble trop tôt pour l'instant pour savoir si ce mécontentement se traduira par un ajustement des pratiques d'irrigation.

1.6.4 Le fonctionnement des puits collectifs

On distingue deux grands types de puits : d'une part les puits gérés par un seul producteur ayant la propriété à part entière des équipements du puits, et le droit d'extraction d'eau obtenu en son nom propre auprès de la commission nationale de l'eau, d'autre part des puits dont la propriété appartient à un

groupe de producteurs. Nous décrirons essentiellement ici les seconds, même si certaines caractéristiques sont communes aux deux types de puits.

1.6.4.1 Environnement physique

Avant de procéder à une description détaillée des mécanismes de fonctionnement des puits collectifs, nous présenterons dans cette section les caractéristiques physiques générales des systèmes irrigués étudiés.

Le forage et la pompe La structure physique du puits collectif comprend différents composants. Le premier composant est le forage, qui correspond à une perforation de l'ordre d'un mètre de diamètre réalisée verticalement dans le sous-sol jusqu'à atteindre la nappe. Les profondeurs de perforation moyennes observées sont de 112 m, mais avec une grande variation spatiale.

Le pompage de l'eau à la surface est réalisé à l'aide d'une pompe aux caractéristiques très variables en termes de puissance et d'efficacité électromécanique. L'eau remonte au travers d'un tube installé au niveau du forage (Figure 1.16). La seule source d'énergie utilisée pour le pompage est l'électricité. Celle-ci est acheminée au puits à partir d'un réseau électrique spécifique, et la compagnie fédérale d'électricité relève mensuellement les consommations de chacun des puits déclarés. Les tarifs électriques appliqués sont spécifiques de l'agriculture.

Du puits à la parcelle

L'eau extraite par la pompe est ensuite convoyée vers les parcelles. Les parcelles sont, en général, réparties de manière relativement compacte autour du puits, mais on peut rencontrer des configurations spatiales moins plus complexes (Figures 1.17 et 1.18).

Pour acheminer l'eau entre le puits et les parcelles, diverses options existent : (a) canaux de terre, (b) diguettes en ciment, et finalement (c) tubes en fonte enterrés et acheminant l'eau jusqu'à l'entrée de la parcelle. La plupart des puits rencontrés ont choisi cette dernière option. En effet, depuis 1990, l'Etat de Guanajuato a mis en place un programme spécifique d'amélioration des infrastructures d'irrigation pour les petits systèmes irrigués. Basé sur les incitations positives (subventions de 50% des coûts) et des menaces de rétorsion dans le futur, ce programme a connu un grand succès auprès des agriculteurs.

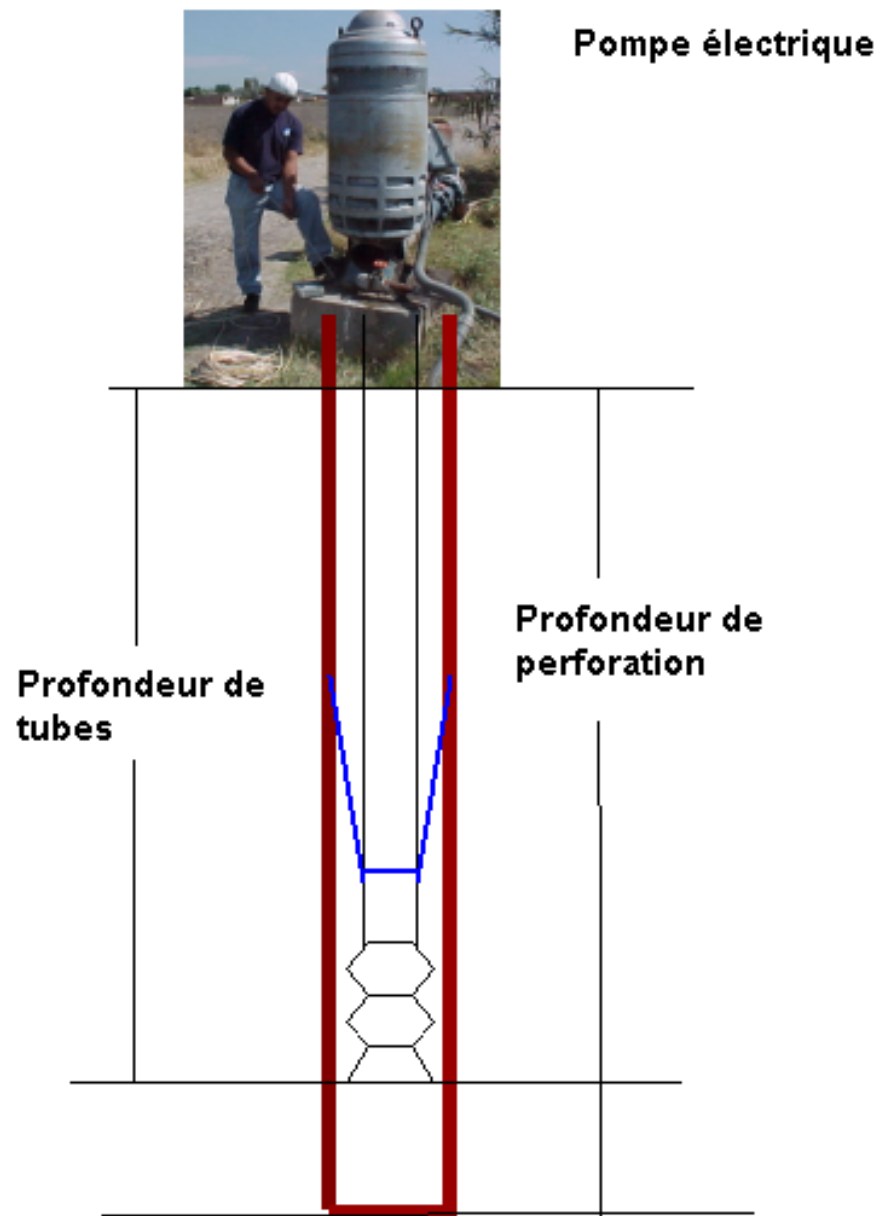


FIG. 1.16 – Infrastructure des puits : la pompe et le forage (Source : Programa de Asistencia en Riego)

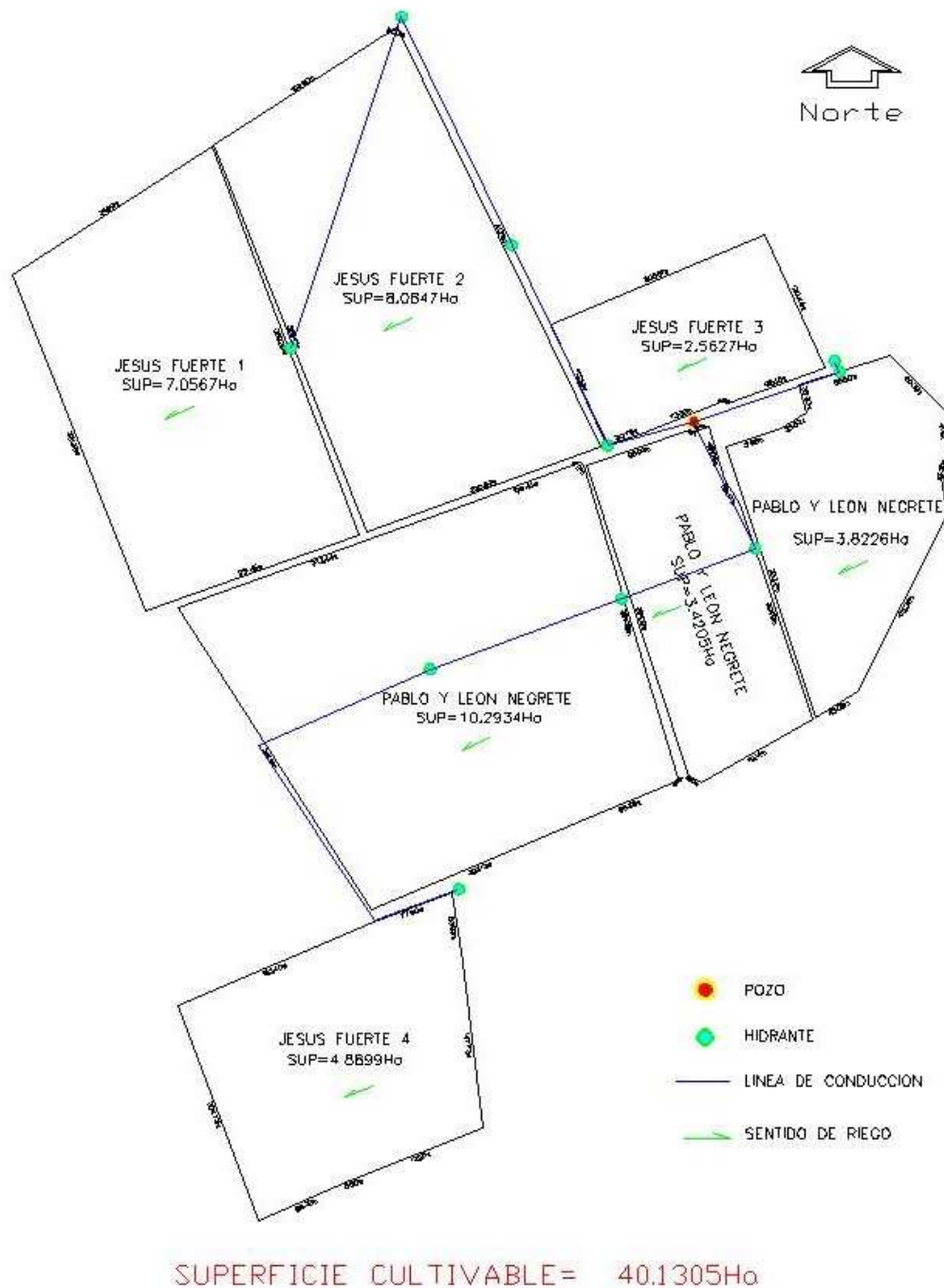


FIG. 1.17 – Un exemple d'infrastructure simple de puits collectifs

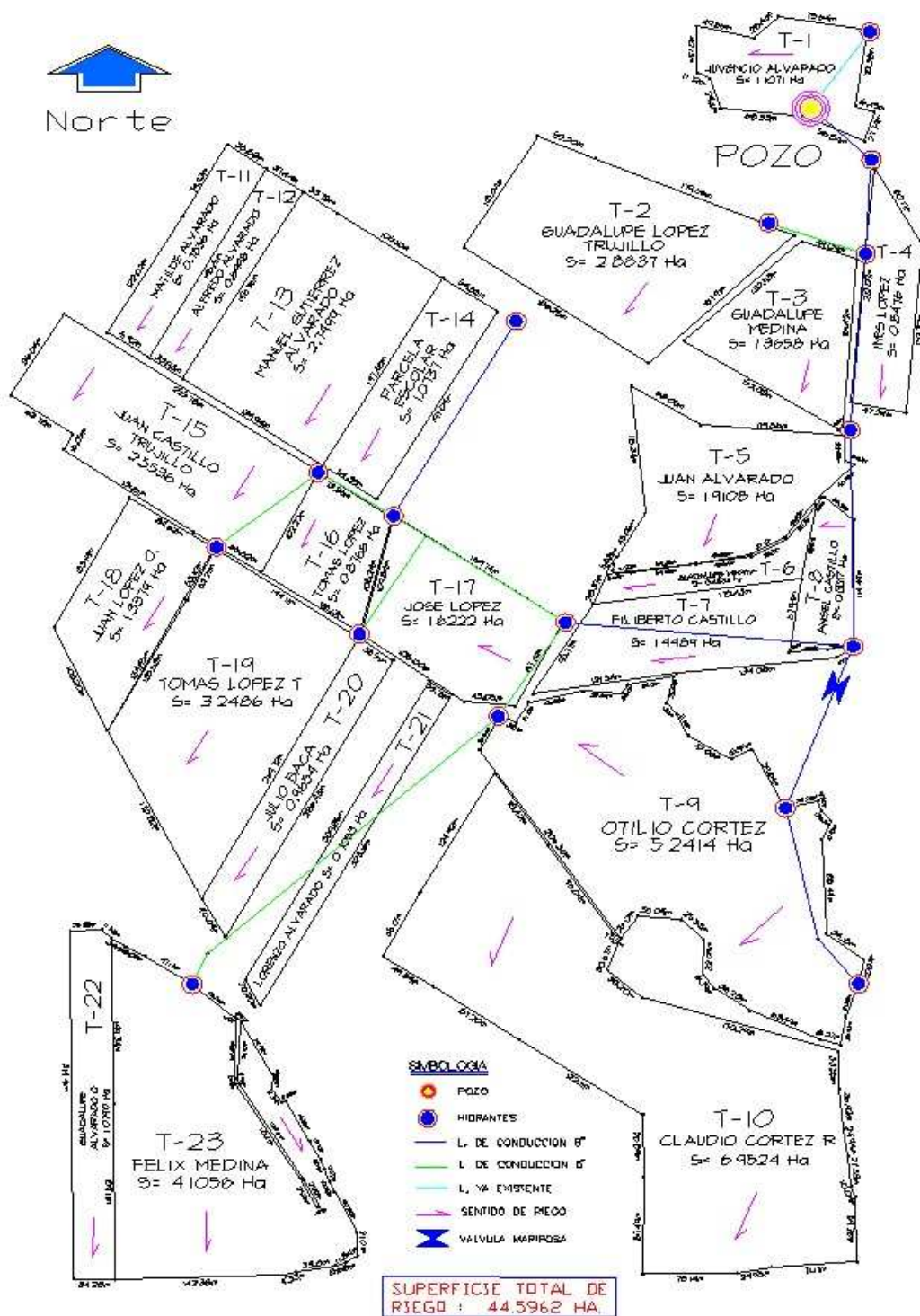


FIG. 1.18 – Un exemple d'infrastructure plus complexe de puits collectifs



FIG. 1.19 – Infrastructure des puits : bouches d'eau à l'entrée de la parcelle (Photo : PAR)

Pratiquement, cela veut dire que les pertes de conduction entre le puits et la parcelle sont quasi nuls. Cela a aussi des implications pratiques pour la gestion des tours d'eau au sein du puits. En effet, contrairement aux situations antérieures où l'eau était acheminée par le biais de canaux de terre, la main d'eau peut passer d'une parcelle à l'autre, sans pertes de temps (passage quasi instantané, puisqu'il suffit d'ouvrir une vanne) et sans pertes d'acheminement (Figure 1.19). Ceci a donc considérablement diminué l'impact du positionnement des parcelles sur le fonctionnement du tour d'eau.

L'irrigation et sa conduite Une fois arrivée à la parcelle, l'irrigation est réalisée à la raie, soit à l'aide de tubes à vannettes (Figure 1.20), soit sous forme ouverte (Figure 1.21).

L'adoption de techniques d'irrigation différentes, e.g. irrigation par aspersion et au goutte à goutte est difficilement envisageable. On remarquera en effet, qu'il implique une restructuration radicale du système physique de distribution de l'eau, nécessitant l'adhésion de tous les membres du groupe. En effet, ces dernières techniques requièrent la mise sous pression de l'eau



FIG. 1.20 – Irrigation à la raie avec tubes à vannettes

avant d'être utilisée. Dans le cas du goutte à goutte, il nécessite également une coordination parfaite entre les producteurs au niveau des calendriers (du fait de la pression, plusieurs parcelles doivent être irriguées simultanément). Dans les faits, nous n'avons observé aucun puits collectif ayant changé son système d'irrigation.

1.6.4.2 Règles internes

L'étude se place ici au niveau des *systèmes irrigués*, et plus spécifiquement des *petits périmètres irrigués*. Un tel système comprend, nous venons de le voir, une source d'approvisionnement en eau, une structure physique (pompes, canaux, ...), mais également les membres du groupe qui gèrent la ressource et finalement les règles, formelles ou informelles, dont les membres se servent pour gérer le système. Ces règles définissent, normalement, qui peut prendre des décisions sur telle ou telle question, quelles actions sont autorisées et interdites, quels sont les flux d'information, quels sont les coûts des activités pour les individus et quelles prestations ils peuvent prétendre recevoir en échange. Ces règles constituent des institutions, au sens de « *règles réellement mises en pratique par un ensemble d'individus pour organiser des activités répétitives qui ont des effets sur ces individus, et éventuellement sur d'autres* » (Ostrom, 1992). Ces institutions modifient le comportement des in-



FIG. 1.21 – Irrigation à la raie sans tubes à vannettes

dividus et les résultats que ceux-ci peuvent attendre de leur comportement.

On peut aborder les institutions au sein des périmètres irrigués sous plusieurs angles. Une première approche, qui mobiliserait les théories des jeux coopératifs et de la négociation, consisterait à analyser la construction des règles institutionnelles au sein des systèmes. La modification des comportements individuels, sous la pression des stimuli extérieurs, modifiera potentiellement les termes de la négociation des règles collectives. En d'autres termes, une nouvelle politique agricole (ici prix ou quota) amènera éventuellement les groupes à réviser leurs règles collectives. Nous n'entrerons cependant pas dans ce domaine de recherche (ce serait l'objet d'une autre thèse !), qui consisterait à analyser et/ou modéliser la genèse et l'évolution des règles collectives au sein des groupes sous l'impact des nouvelles conditions macro-économiques ou de l'état de la ressource. Cela supposerait alors en effet d'entrer dans la compréhension des mécanismes de négociation à l'intérieur des groupes (formation de coalitions, etc.), ce qui ne sera pas notre prétention ici.

Une deuxième approche, qui sera la notre, consiste à analyser ce que serait le comportement de producteurs rationnels quand certaines règles sont mises en place, sans se soucier de la genèse de cette règles. Les principales règles observées sont les règles de distribution (le tour d'eau et ses règles, i.e. qui prend de l'eau à quel moment ?), les règles d'allocation de la ressource (com-

bien chaque membre peut-il prendre?), et les règles d'allocation des coûts de gestion de cette ressource (qui paie la ressource, et selon quelle barème et quelle assiette?). Les règles instaurées au sein des groupes laissent cependant une certaine liberté d'action aux différents membres individuels. Dans notre cas, les producteurs ont souvent défini les modalités de distribution de l'eau, le tour d'eau, et de paiement des coûts d'extraction. En général, ces règles laissent encore une grande liberté d'action aux producteurs : choix de la superficie irriguée, choix des cultures, choix des quantités appliquées. Les choix d'un individu, dans le cadre des règles établies, ont souvent un impact sur le bien-être et les décisions de l'ensemble des individus du groupe. Les règles induisent donc des *interactions stratégiques* entre les différents producteurs. C'est d'ailleurs l'effet de ces interactions stratégiques au sein des systèmes irrigués qui nous intéressera ici.

Notre analyse des règles collectives s'effectuera donc à plusieurs niveaux : premièrement on effectuera un recensement des règles collectives existantes dans les groupes (Chapitre 3). Après ce premier travail, on cherchera à modéliser ces règles par le biais de la modélisation (Chapitres 6 et 7).

1.7 Conclusions

Ce chapitre introductif avait pour vocation essentielle réaliser un premier état des lieux de l'environnement dans lequel s'est effectué le travail de recherche et des problèmes auxquels sont confrontés les décideurs politiques de la région.

Après avoir développé, avec succès, la demande en eau dans le Bajío, force est de constater que l'heure est maintenant à une réduction de la demande. Les instruments de gestion de la demande, sont à l'étude pour certains, se mettent en place pour d'autres.

Après quelques généralités sur la nature de la ressource eau, nous avons également voulu décrire l'environnement physique et le fonctionnement des petits périmètres irrigués collectifs. En effet, les caractéristiques physiques du milieu et des systèmes d'irrigation sont souvent à l'origine de comportements parfois jugés trop rapidement comme irrationnels. Nous avons donné une première idée du fonctionnement physique et institutionnel des puits collectifs, nous y reviendrons plus en détail dans le chapitre 3.

Le caractère collectif des puits donne tout son importance aux interactions stratégiques entre les producteurs d'un même puits. Nous essaierons donc, au travers de modèles stylisés, d'en présenter la nature et les effets. Ce sera l'objet du chapitre 4.

Avec le chapitre 5, nous regarderons en détail les différentes options techniques à la disposition des producteurs de la région étant données les caractéristiques agro-écologiques. Ce sera pour nous l'occasion de présenter le travail intermédiaire de modélisation biophysique qui servira d'intrants aux modèles économiques.

Les chapitres 6 et 7, nous permettrons de développer notre modèle de puits collectif. Vu l'ampleur de la tâche, nous avons séparé ce travail en deux chapitres différents : le chapitre 6 détaillera le modèle coopératif alors que le chapitre 7 détaillera le modèle de puits collectifs non-coopératif.

Les chapitre 8 et 9 permettront de présenter et de discuter sur les résultats des simulations effectuées. Le chapitre 10 par une analyse critique du travail effectué nous permettra de conclure ce travail de recherche, et d'ouvrir sur les perspectives que le temps ne nous a pas permis d'explorer.

Il est donc temps maintenant de présenter avec plus de précision notre problématique générale, ainsi que les référents théoriques qui ont servi à construire notre travail de recherche.

Chapitre 2

Problématique et orientations théoriques

2.1 Contours de la problématique

2.1.1 Question initiale

Dans un contexte de raréfaction de la ressource, la question principale qui nous est posée est d’anticiper l’impact potentiel sur les systèmes de production agricoles du Bajío des politiques agro-environnementales visant à réduire leur consommation brute en eaux souterraines.

Avant d’aller plus loin, dans le traitement de la question, il est nécessaire d’en dessiner correctement les contours. Pour ce faire, nous commencerons par éliminer les thèmes que nous ne traiterons pas ici.

Premièrement, nous ne remettrons pas ici en cause le bien-fondé des objectifs de réduction de consommation brute par l’agriculture. En d’autres termes, l’allocation inter-sectorielle et inter-générationnelle de la ressource eau est supposée résolue de manière exogène, nous n’analyserons donc pas ici sa pertinence. Nous positionnons notre travail, comme une analyse d’impact potentiel d’une décision politique.

Deuxièmement, notre étude s’intéressera exclusivement à l’extraction des eaux souterraines. Dans la région d’étude, l’agriculture bénéficie de deux sources d’eau, l’eau de surface alimentant un large périmètre irrigué, et l’eau souterraine utilisée par des petites unités d’irrigation. Ce sont le compor-

tement de ces dernières qui nous intéressera ici. Elles représentent 80% des extractions brutes d'eau des aquifères de la région et 60% de l'eau utilisée pour l'irrigation dans le Bajío (CEAG, 1999). Les extractions sont le fait de deux grands types d'unités d'irrigation : des agriculteurs possédant un puits individuel, et des groupes d'agriculteurs gérant en commun un puits. C'est cette dernière catégorie de producteurs qui nous intéressera ici. En effet, le caractère collectif de la gestion de la ressource en eau est susceptible de poser un certain nombre de problèmes particuliers qui rendront les effets de politiques de prix différents que dans le cas d'utilisation individuelle d'un puits.

Troisièmement, et comme corollaire des points précédents, nous ne traiterons pas des effets de cette politique au niveau de l'aquifère. La notion d'utilisation nette de l'eau dépend en effet des limites du système que l'on observe (Seckler, 1996 ; Barker *et al.*, 2003). Si le système observé est le système de culture et de production, toute eau apportée à la parcelle qui percole au-delà de la zone racinaire est perdue pour le système. Si le système observé est le bassin versant, l'eau qui retourne à la nappe n'est alors plus obligatoirement perdue. Cependant, les nappes étant situées à environ 100 m de profondeur, le temps nécessaire au retour de l'eau dans le système est important. Si nous gardons, comme nous nous proposons de le faire, une vision de court terme, nous ne pourrions pas considérer ces retours dans le système du bassin. Une analyse au niveau des systèmes de production est donc suffisante.

Quatrièmement, nous ne traiterons pas des externalités qui pourraient apparaître entre les différentes unités d'irrigation utilisant en commun les aquifères. En effet, les eaux souterraines peuvent être considérées comme un bien en propriété collective dont l'accès est restreint par les droits d'extraction, mais pour lesquelles on identifie deux types d'externalités entre utilisateurs :

- *les externalités de coût de pompe* : l'extraction par un utilisateur abaisse le niveau de la nappe phréatique pour tous, et augmente donc les coûts d'extraction futur de tous les autres utilisateurs.
- *les externalités stratégiques* : du fait du caractère collectif de la propriété sur le stock d'eau souterraine, un producteur n'a de droits réels et effectifs que sur l'eau qu'il a effectivement pompée. Ce qu'un producteur n'extraie pas aujourd'hui, un autre producteur pourra, au moins en partie, l'extraire. La possibilité que le producteur ne puisse pas pomper

demain, ce qu'il pourrait pomper aujourd'hui, diminue les incitations de chacun des producteurs à épargner le stock d'eau.

Ces deux types d'externalités dynamiques jouent en défaveur d'une utilisation efficiente des eaux souterraines (Negri, 1989 ; Provencher et Burt, 1993). Cependant, Gisser et Sánchez (1980) ont présenté une première estimation numérique de l'inefficience générée, et ont montré que, si le stock de l'aquifère est suffisamment grand, la différence entre un équilibre social et un équilibre avec externalités est extrêmement faible et peut être négligée. Plus récemment, Rubio et Casino (2003) en utilisant les jeux différentiels, ont confirmé que les deux types d'externalités n'avaient qu'un impact faible sur les comportements des producteurs. Nous avons donc décidé d'ignorer les interactions stratégiques entre systèmes irrigués, nous considérerons donc que les producteurs sont myopes et que leurs décisions sont prises dans un cadre statique.

Deux types de politiques économiques, dont on analysera par la suite la pertinence, seront analysés ici. La première politique consiste à augmenter les tarifs de l'électricité agricole afin d'augmenter les coûts d'extraction. La deuxième consiste à restreindre les temps d'électricité disponibles (sorte de quota d'électricité attribué aux unités d'irrigation). L'alimentation électrique des puits agricoles étant indépendante de l'alimentation électrique des habitations, on peut effectivement envisager de fournir de l'électricité qu'un nombre limité d'heures par jour. Dans les deux cas, on s'attend à un changement de comportement des unités de productions, tant au niveau des techniques ou pratiques d'irrigation, que des grandes orientations stratégiques prises par les producteurs (types de cultures, pluri-activité, migration, etc.). Parallèlement, on s'intéressera à l'impact potentiel des innovations techniques à base de semis direct sous couvert végétal promues par les centres de recherche et les décideurs politiques régionaux. Enfin, on s'intéressera au potentiel d'un travail sur les innovations institutionnelles au sein des puits collectifs.

2.1.2 Quels impacts ?

Une analyse d'impact suppose un certain nombre de critères objectifs. Quatre critères seront retenus ici : l'efficacité, la productivité, l'efficience et l'équité.

2.1.2.1 L'efficacité

Est-ce que la mesure prise conduit réellement les producteurs à changer leur comportement dans le sens recherché ? En d'autres termes, est ce que les systèmes irrigués étudiés réduisent effectivement leur consommation brute en eau d'irrigation. L'efficacité sera donc mesurée par un critère simple de consommation annuelle en eau des systèmes étudiés.

La réponse n'est pas aussi évidente qu'elle y paraît ! Premièrement, un certain nombre d'études empiriques montrent la faible élasticité des systèmes de production agricoles au prix de l'eau (Bontemps *et al.*, 2001 ; de Fraiture et Perry, 2002). Deuxièmement, le caractère collectif de la gestion des puits pourra changer la nature des signaux transmis *in fine* aux producteurs.

Sur ce thème de l'efficacité des politiques, nous aurons donc trois questions sous-jacentes :

- *A partir de quel niveau de taxe ou de réduction de la disponibilité en électricité constatera-t-on une diminution réelle et significative de la consommation en eau d'irrigation ?* Les aquifères sont surexploités, un retour à leur gestion durable suppose donc une diminution des extractions nettes en eau. Par ailleurs, il est également demandé à l'agriculture de céder sa place aux autres utilisateurs (villes et industries). Nous vi- serons donc une diminution de 30 à 45% des consommations brutes par l'agriculture¹.
- *Quelle sera la nature de la réduction des consommations ?* Du point de vue du producteur, il existe plusieurs solutions pour réduire sa consommation brute : la première consiste, à surface égale, à implanter des cultures et employer des techniques moins demandeuses en eau, la deuxième consiste à réduire les surfaces irriguées, la troisième est une combinaison des deux premières. Sans entrer dans un bilan au niveau de l'aquifère, la nature de la réduction de la consommation aura des impacts différents sur l'évolution future de l'aquifère, nous devons donc analyser la nature des réductions de consommation.

¹Le déficit moyen constaté au niveau des aquifères du Bajío est de 45% des entrées. Si nous recherchons, nous seulement une diminution de la demande globale et une réallocation d'une partie de la demande agricole vers les autres secteurs, nous devrions avoir des objectifs plus importants. Cependant, nous avons considéré le chiffre de 40% un effort suffisamment important vu la fragilisation déjà constatée par ailleurs de l'agriculture de la région

- *Le caractère collectif de la gestion de l'eau au niveau des petites unités d'irrigation étudiées impliquera-t-il des résultats différents en terme d'impact des mesures prises ?* Nous devons ici analyser les interactions entre les institutions existantes au sein des puits collectifs et les politiques envisagées. Est-ce que les institutions en place au sein des puits collectifs favorisent les économies en eau ou au contraire elles découragent les économies de chacun des membres ?

2.1.2.2 La productivité économique partielle de l'eau d'irrigation

*« More crop per drop : which crop and which drop ? »
(Molden et al., 2003)*

Tout d'abord, la notion de productivité partielle de l'eau d'irrigation mérite un détour. La productivité économique relative d'un intrant est mesurée comme le ratio d'une valeur ajoutée et d'une quantité d'intrant utilisée. La notion de valeur générée ne pose *a priori* pas de problèmes de définition, mais il reste à définir avec précision la quantité d'eau utilisée.

Il existe plusieurs définitions alternatives et une certaine confusion dans les notions de productivité et d'efficience d'irrigation selon que l'on utilise l'eau apportée à la parcelle, où l'eau effectivement utilisée par les plantes (Barker *et al.*, 2003). Pour notre calcul de productivité *stricto sensu*, nous identifierons la quantité d'eau consommée comme étant celle qui est apportée à la parcelle.

Sur ce thème de la productivité partielle de l'eau, nous aurons donc trois questions sous-jacentes :

- Est-ce que les mesures appliquées conduiront à une meilleure valorisation économique de l'eau ? Pour une quantité d'eau consommée moindre (objectif recherché), la production de biens agricoles pourra-t-elle être maintenue, par exemple par le biais du changement technique (semis direct) ou plus simplement par le biais de changement des pratiques d'irrigation pour une technique donnée ?
- Les politiques mises en place ne conduiront-elles pas à un abandon, au moins partiel, de l'agriculture irriguée ? Dans le cadre du Bajío, les producteurs n'abandonneront-ils pas les cultures irriguées durant le cycle d'hiver où la productivité économique de l'eau est la plus faible

pour se concentrer sur une irrigation d'appoint pour les cultures d'été où la productivité économique de l'eau est la plus forte ?

2.1.2.3 L'efficience

L'allocation d'une ressource rare entre plusieurs usages est une allocation efficiente si elle permet de maximiser le bénéfice net total qui peut être généré à partir de la quantité disponible de cette ressource. Si, dans le calcul du bénéfice net, on n'impute que les coûts variables et que l'on ne considère ni les coûts fixes ni les amortissements, l'allocation est efficiente dans le court terme. En l'absence de contraintes ou de distorsions dans les prix et les coûts, l'allocation est Pareto-efficiente ou un optimum de premier rang, ce qui veut dire que l'on ne peut changer l'allocation de la ressource sans pénaliser un au moins des utilisateurs de la ressource. En revanche, en présence de contraintes, le bénéfice net maximum qui peut être généré sera considéré un optimum de second rang.

Comme nous avons considéré l'allocation intersectorielle de l'eau des aquifères hors champ de notre recherche, nous ne rentrerons donc pas dans l'évaluation de l'efficience de l'allocation de l'eau à cette échelle. Plutôt, ce qui nous concernera est l'allocation de la ressource au niveau des puits collectifs.

Sur ce thème de l'efficience, nous aurons donc comme questions sous-jacentes :

- *Existe-t-il une différence significative entre les équilibres efficients (socialement optimaux) et les équilibres prenant en compte les interactions stratégiques entre producteurs au sein d'une unité d'irrigation ?* On comparera en l'absence de règles au sein des puits, l'équilibre socialement efficient avec les équilibres individuels.
- *Le règles collectives au sein des puits permettent-elles de s'approcher des équilibres efficients ?* On comparera alors les équilibres sous différents cadres institutionnels, avec l'équilibre efficient.

2.1.2.4 L'équité

Le concept d'équité s'intéresse à la distribution de la valeur économique totale générée par cette ressource entre les différents utilisateurs. Traditionnellement, les économistes néo-classiques ont donné plus de poids à la notion

d'efficience qu'à la notion d'équité. Les mesures d'équité peuvent être descriptives ou normatives. Les mesures descriptives évaluent la dispersion des revenus à travers d'une mesure statistique. Les mesures normatives sont dérivées d'une fonction de bien-être (welfare).

L'idée est bien ici de comparer les distributions de revenu au sein d'un puits en fonction des différents types de politiques appliquées et des règles collectives décidées par le groupe. Cependant, au-delà de la distribution *per se* des revenus au sein des puits collectifs, on s'intéressera surtout à la répartition des rentes produites par certaines règles collectives au sein des puits.

D'un point de vue micro-économique, une rente est définie comme l'excédent de profit que procure l'usage d'un facteur de production par rapport à ce que ce facteur pourrait rapporter dans son meilleur usage alternatif sur un marché concurrentiel. Cet excès de profit peut être généré par une position économique spécifique. Notre comparaison des équilibres socialement optimaux et équilibres non-coopératifs, nous permettra de mesurer le niveau des rentes créées par les règles collectives et son évolution avec l'augmentation des tarifs électriques ou des quotas. Elle permettra d'identifier, dans l'hypothèse d'un changement institutionnel, les gagnants et les perdants.

2.2 Quelles théories et quels instruments mobiliser ?

Pour traiter notre problématique, nous devons mobiliser plusieurs secteurs de la théorie économique. Premièrement vu le caractère économique de la ressource, nous devons nous intéresser à l'impact des instruments de gestion de la demande en eau d'irrigation. Nous porterons en particulier notre attention sur la tarification et les quotas. Mais le droit d'extraction dans un aquifère par un collectif de producteurs est également une ressource en propriété commune. La gestion des biens en propriété commune et les théories de l'action collective seront donc également mobilisées.

Parallèlement, nous nous intéresserons à la modélisation des interactions stratégiques entre producteurs. Pour ce faire, nous examinerons donc la littérature sur la formation des prix dans un contexte de marché oligopolistique. Finalement, les acquis de la recherche opérationnelle et des modèles

bio-économiques constitueront les supports de modélisation.

2.2.1 Les instruments de gestion de la demande en eau

Il existe déjà une importante littérature sur les effets des instruments économiques sur la consommation en eau par l'agriculture. Le but n'est pas d'en faire une bibliographie exhaustive, mais d'en faire ressortir les points importants. En l'absence de marchés, les instruments économiques traditionnels sont la tarification, les subventions ou les quotas.

L'idée de la tarification est de transmettre aux consommateurs un signal de rareté afin qu'ils utilisent la ressource de manière plus efficiente. En présence d'externalités, les instruments économiques serviront éventuellement à corriger certaines défaillances de marché.

2.2.1.1 La tarification de l'eau

On supposera tout d'abord un fournisseur d'eau nommée ici l'agence, et des consommateurs, les producteurs. Ce cas de figure peut s'appliquer aussi bien au cas des grands périmètres irrigués, gérés par l'Etat, qu'à celui des petits périmètres gérés par des petites associations de producteurs. Dans ce dernier cas, l'agence correspondra au collectif des propriétaires du puits.

Diverses méthodes de tarification existent (Rhodes et Sampath, 1988; Sampath, 1992; Chohin-Kuper *et al.*, 2002). Elles peuvent être classées en fonction de l'assiette de tarification.

La *tarification volumétrique* se base sur une mesure directe ou indirecte de la consommation en eau du producteur. La mesure directe s'effectue à l'aide de compteurs volumétriques et ne pose pas de problèmes particuliers. Certaines institutions calculent les volumes consommés de manière indirecte, au travers des temps de consommation ($\text{volume} = \text{temps} * \text{debit}$). Comme le coût de collecte d'information des consommations réelles est souvent très important, des *indicateurs non volumétriques* ont également été développés.

L'assiette de tarification prend donc des formes diverses. On distingue ainsi :

- *La tarification au prorata des productions.* Si l'on suppose une relation forte entre les rendements obtenus et la consommation en eau, et

que les données de rendements sont plus facilement identifiables que la consommation en eau.

- *La tarification au prorata des consommations en intrants* (ex. engrais), dont la consommation est fortement corrélée à la consommation en eau.
- *La tarification au prorata des superficies emblavées*. Les indicateurs de superficie sont souvent les plus faciles à mesurer, cette méthode est donc largement répandue.
- *La tarification binôme simple* (« two part tariff »), se compose d'une tarification volumétrique au coût marginal d'approvisionnement et d'un coût fixe annuel d'admission (sorte de droit d'entrée). Selon les cas, ce coût fixe est le même pour tous les producteurs ou sera fonction des superficies mises en cultures. Cette méthode est appliquée dans les situations où l'agence fournit de l'eau à un coût marginal inférieur au coût moyen et est contrainte d'équilibrer son budget. Des variantes sont parfois proposées, comme une combinaison entre charge fixe annuelle au prorata des superficies équipées, et une charge au prorata des superficies irriguées (Le Gal *et al.*, 2003).
- *Betterment levy*. On charge alors le producteur sur le gain de valeur de la terre du à l'approvisionnement en eau d'irrigation.
- *la tarification par blocs* (« increasing block tariff ») charge les utilisateurs en proportion directe à la consommation, avec des tarifs progressifs et croissants. Dans ce système, on pourra également inclure des charges forfaitaires. Ce dernier système est très souvent utilisé pour la tarification de l'eau dans les centres urbains. Un exemple de tarification extrait de Komives (1998) est présenté en figure 2.1. Dans ce cas, la structure de prix a été adaptée en fonction du type de consommateur (privé, commercial ou industriel).
- *la tarification proportionnelle au volume consommé avec redistribution forfaitaire uniforme* (« uniform price with rebate ») a été proposée par Boland et Whittington (2000). Il consiste à fixer le prix de l'eau à son coût marginal (unique), et de pratiquer une charge négative (une redistribution) forfaitaire par consommateur. Ce système présente en effet l'avantage de transmettre le signal prix à tous les utilisateurs. Il favorise donc l'utilisation efficiente de la ressource. Par ailleurs, la redistribution uniforme permet de ne pas générer des transferts de revenus hors

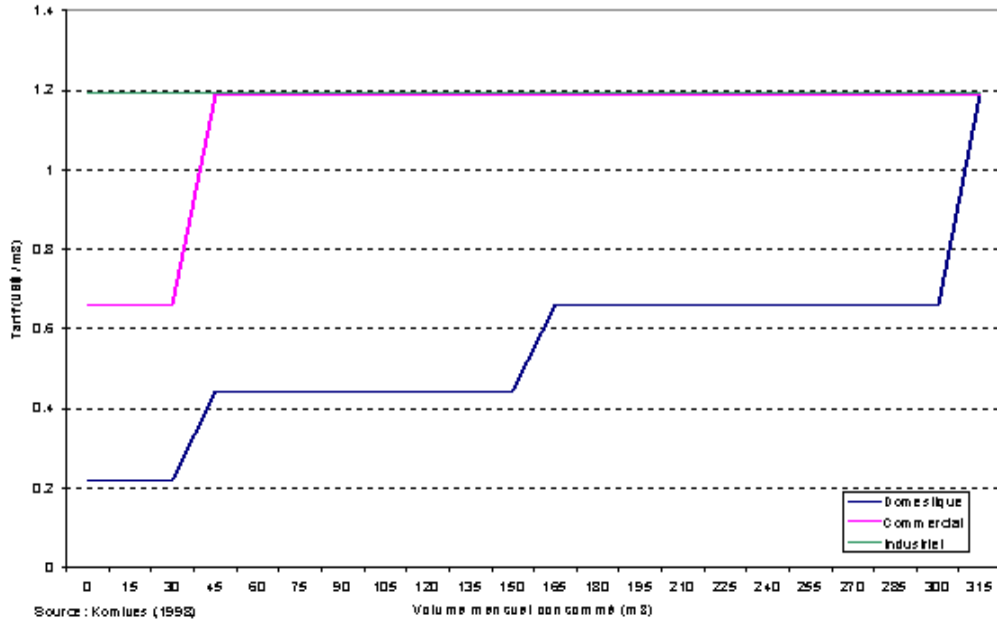


FIG. 2.1 – Un exemple de tarification par blocs : structure tarifaire de la ville de La Paz (Bolivie)

des utilisateurs. Ce sera particulièrement intéressant dans notre cas de figure, car ce type de tarification permettrait de gérer la demande en eau en envoyant un signal prix aux producteurs suffisamment fort, sans toutefois avoir un impact trop important sur les revenus.

Dans le cas d'un producteur i produisant une seule culture, selon une fonction de production $f(x, q)$, ces différents types de tarification peuvent être résumés par la description de sa fonction de profit :

$$\pi_i(x, q) = (p - t_y) \cdot f(x, q) - (r + t_x) \cdot x - t_w \cdot q - t_a + t_u \quad (2.1)$$

où x est un vecteur de consommation d'intrants, q est la consommation en eau, et les coefficients t_y , t_x , t_w , t_a et t_u correspondent aux différentes taxes évoquées précédemment, i.e., taxe sur les produits, taxe sur les intrants, tarif volumétrique, tarif au pro-rata des surfaces, et redistribution forfaitaire.

Nous passons maintenant en revue ces différentes tarifications.

L'eau se paie en fonction de la quantité réellement consommée : la tarification volumétrique. On prend tout d'abord le cas d'un producteur

unique. On est dans le cas où $t_y = 0$, $t_x = 0$, $t_a = 0$ et $t_u = 0$.

L'agence facture l'eau au producteur au prix t_w . La question pour l'agence est de fixer un prix t_w qui maximise le bien-être social. Si l'on suppose l'absence de coûts de transactions et d'implémentation, le profit de l'organisation est $\pi_a = t_w \cdot q - c(q)$ où $c(q)$ représente la fonction de coût d'extraction et d'approvisionnement de l'eau par l'agence. Si l'on cherche à maximiser le bien-être social $\Pi = \pi_a + \pi_i(x, q)$, on obtient par les conditions de premier ordre :

$$p \cdot f_q(x, q) = c'(q) \quad (2.2)$$

$$p \cdot f_x(x, q) = r \quad (2.3)$$

Autrement dit, l'optimum social est obtenu quand le gain marginal du producteur est égal au coût marginal d'approvisionnement en eau.

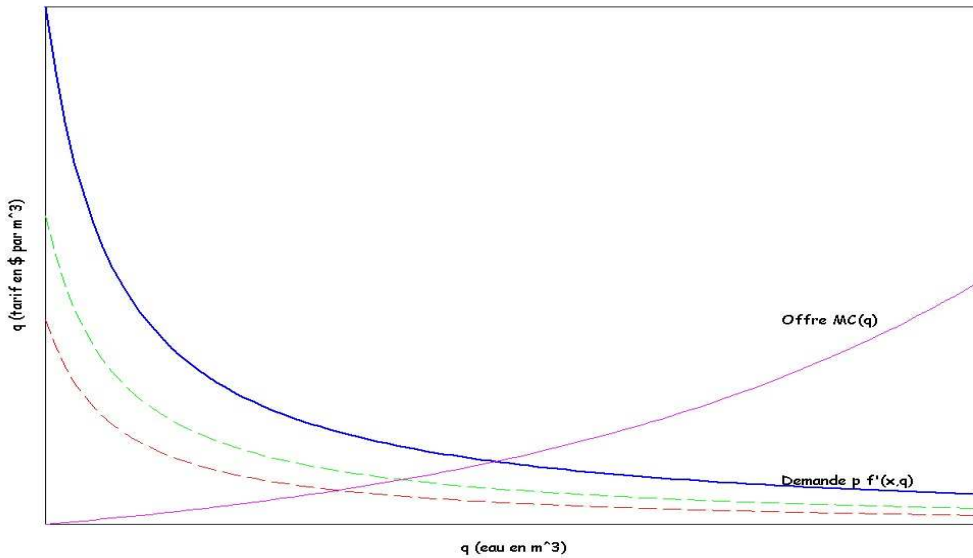


FIG. 2.2 – Tarification de l'eau : le cas de plusieurs producteurs.

Dans le cas de plusieurs producteurs, on crée une fonction de demande agrégée, en sommant horizontalement les demandes individuelles. Le prix t_w à l'optimum social est obtenu l'intersection entre la demande agrégée et l'offre (Figure 2.2).

La tarification volumétrique, sans coûts de transactions, permet donc d'obtenir un optimum de premier rang. Elle présente cependant un certain

nombre de problèmes.

Les coûts importants d'implémentation et de collecte d'information de la tarification volumétrique La tarification volumétrique suppose la collecte d'information sur la consommation des producteurs. Ceci implique la mise en place chez les agriculteurs d'instruments de mesure de la consommation (compteurs volumétriques), et l'établissement d'une structure administrative permettant le contrôle de l'utilisation et la collection des paiements (OCDE, 1987 ; Sampath, 1992). Ces fonctions sont, en général, prises en charge par l'agence. Cela implique donc des coûts de mesure et de maintenance du système. Ces coûts ont une composante fixe importante et des coûts proportionnels à la consommation. Si nous reprenons notre raisonnement, les conditions d'équilibre incluront donc maintenant le coût marginal d'implémentation de la tarification (Tsur et Dinar, 1997). La présence de coût fixes, ne permet plus d'atteindre l'optimum de premier rang. On obtient alors un optimum de second rang qui n'est pas forcément supérieur à d'autres solutions plus simples à mettre en œuvre (cf infra.)

Variations inter-annuelles de la demande et de l'offre La tarification au coût marginal suppose de connaître le coût marginal ! Quand la demande et l'offre sont plus ou moins constants, cela ne pose pas de problèmes majeurs d'implémentation. Or l'offre et la demande peuvent varier fortement au cours de l'année. Dans ce cas, un tarif unique ne fournit pas le signal de rareté adéquat au consommateur (Sampath, 1992). Idéalement donc, les tarifs doivent alors être différenciés en fonction de la période de consommation. Un exemple de ce type de tarification différenciée est trouvé dans Maharashtra en Inde, où les tarifs varient en fonction de la culture, mais aussi de la saison. Plus généralement donc, la tarification « tiered-pricing » adresse ce problème dans les pays où un système sophistiqué de mesure le permet (Johansson, 2000).

Le même problème se pose quand les coûts d'approvisionnement marginaux ne sont pas identiques en tout point du réseau. Par exemple, certaines parties du réseau peuvent nécessiter un repompage, ce qui induit un coût marginal supérieur. Une tarification par blocs homogènes paraît alors nécessaire. Si l'on combine les deux effets (temps et espace) une tarification en

temps réel serait nécessaire (Zarnikau, 1994).

Des problèmes d'équité Dans les périodes où la demande est forte, le prix de l'eau va augmenter, ce qui affectera en premier les producteurs ayant un revenu faible. Les problèmes d'équité doivent être étudiés quand la tarification au coût marginal provoque des hausses de prix telles que certaines catégories de producteurs n'auraient plus accès à l'eau d'irrigation (Dinar *et al.*, 1997).

Coût marginal de court terme ou de long terme ? Quand les capacités d'approvisionnement en eau sont dépassées par rapport à la demande, l'agence pourra investir des sommes considérables pour re-dimensionner son réseau d'approvisionnement. Le coût marginal d'approvisionnement (stricto sensu) peut donc augmenter singulièrement, au moins dans le court terme, et ne se stabilisera qu'après amortissement des investissements. Diverses méthodes opérationnelles de tarification ont été développées pour le calcul du coût marginal en cas d'augmentations successives de la capacité (Maan et Beecher, 1996).

Coût réel de l'eau La définition du coût marginal de l'eau se réduit bien souvent à un coût marginal d'extraction et/ou d'amenée de l'eau, négligeant ainsi le coût réel de l'eau utilisée. Ce raisonnement est valide si l'on s'occupe du maintien des infrastructures nécessaire à l'utilisation de l'eau, mais néglige complètement les autres composantes du coût de l'eau : valeur d'option, valeur environnementale, etc.

L'eau en tant qu'intrant non mesuré : tarification non-volumétrique Dans de nombreux cas, l'agence ne dispose pas d'informations sur les volumes réels utilisés par l'agriculteur. Dans ce cas, la quantité d'eau utilisée par chaque producteur reste une information privée du producteur. Si les utilisateurs prennent en charge la totalité des coûts de l'eau, la non-révélation de cette information n'a que peu d'influence sur l'évolution du système, car chacun prendra en compte le coût réel de l'eau lors de ses décisions de consommation.

Cependant, dans de nombreux cas de figure, l'utilisation de l'eau entraîne des coûts qui ne sont pas pris en charge directement par les utilisateurs,

comme par exemple :

- Externalités dans les coûts d'extraction : l'extraction de l'eau aujourd'hui augmente les coûts futurs d'extraction pour l'ensemble des producteurs puisant dans un aquifère ;
- Coûts d'acheminement pris en charge par le fournisseur d'eau ;
- Rente de rareté qui se mettent en place quand l'eau se raréfie.

Dans ces cas, une forme de régulation de la demande est nécessaire. Les tarifications liées à des variables en relation avec la consommation en eau sont utilisées. Mais la solution la plus largement employée, est une tarification forfaitaire t_a par unité de surface, indépendante de la consommation réelle.

L'instrument prix ne permet alors plus d'agir directement sur la demande du producteur. Le producteur optimise une fonction de production « agromique », sans se soucier du coût de l'eau, le coût marginal d'une unité supplémentaire d'eau étant nul.

La tarification forfaitaire ne permet pas d'obtenir une solution efficiente (« *first best* ») et ne permet pas de réguler la demande en eau. Pour autant, cette solution est couramment adoptée (Bos et Walters, 1990).

Les investissements prohibitifs d'installation de compteurs volumétriques, et de suivi de la consommation peuvent en partie expliquer cela. De plus, Tsur (2000) montre que, quand les coûts d'implémentation et d'acquisition d'information sont importants, la tarification forfaitaire et la tarification volumétrique peuvent arriver aux mêmes résultats.

Enfin, tarification forfaitaire n'étant pas forcément synonyme de tarification unique, elle est souvent modulée en fonction de la culture, du système d'irrigation employé, et de la saison (Johansson, 2000). Cela permet à l'agence d'être opérationnelle à un coût faible d'obtention d'information sur l'utilisation de l'eau, tout en pouvant inciter les producteurs vers des cultures moins consommatrices d'eau.

Applicabilité de la littérature sur la tarification à notre problème

Notre problème est bien un problème de tarification de l'eau afin d'agir sur la demande et non un problème de tarification pour la maintenance des infrastructures d'irrigation (grand périmètres). En ce sens, nous ne sommes pas concernés par le débat entre tarification au coût marginal ou au coût moyen. Ce qui nous intéresse est de connaître de construire une courbe de

demande en eau en fonction des tarifs électriques, pas de connaître les tarifs qui permettraient de maintenir une infrastructure.

Les consommations d'eau au niveau des aquifères sont difficilement observables. Cependant, les producteurs étant reliés au réseau électrique, on peut aisément contrôler la consommation des puits, et aisément transmettre le signal prix de l'eau au travers du signal prix de l'électricité. On s'intéresse bien à la tarification volumétrique, car les coûts de suivi et de révélation de l'information sont déjà réalisés. Plusieurs tarifications seront testées ici, tarification uniforme, uniforme avec remise fixe, et tarification par paliers.

En général cependant, cette littérature ne prend pas en compte les interactions stratégiques entre producteurs utilisant une même ressource. Implicitement, elle oublie donc les problèmes d'externalités entre utilisateurs d'une même ressource. Ces problèmes sont gérés par le biais des règles collectives, au rang desquelles l'allocation des coûts d'extraction entre les différents membres relève des mêmes problèmes de tarification, mais appliqués à l'échelle des membres des puits collectifs. Nous pourrions donc utiliser ces références pour les deux échelles de l'étude.

2.2.1.2 Les quotas

Un système de quotas consiste à limiter de manière normative la consommation des agents économiques, c'est à dire à leur allouer une quantité maximale de ressources à consommer par unité de temps. Le système de quotas est un instrument de gestion autoritaire avec les problèmes d'implémentation liés à toute mesure réglementaire. Contrairement aux incitations économiques où l'on cherche à générer un comportement voulu au travers de signaux économiques, les quotas limitent directement le domaine des possibles pour les individus.

Classiquement, on identifie trois types de quotas (par exemple, Montginoul, 1997) :

- *Le quota volume* : un volume maximum prélevable sur la ressource par unité de temps et par unité de référence. L'unité de référence sera, selon les cas, une unité de surface ou une unité de production ($x \text{ m}^3$ par producteurs). Dans le premier cas, l'allocation se fait entre les surfaces irriguées, il faut donc irriguer pour avoir accès au quota, dans le

deuxième entre les unités de production que l'on irrigue ou non.

- *Le quota débit* : un débit connu réparti entre les différents utilisateurs, surtout applicable aux grands périmètres irrigués ou aux irriguants s'alimentant dans une rivière.
- *Le quota temps* : correspond à une limite sur le temps de pompage de chacun des irriguants par unité de référence (surface ou unité de production), et par période. Ce type de quota incitera les producteurs à augmenter leur capacité de pompage pour capturer une part plus importante de la ressource, et présente donc un certain nombre d'inconvénients.

Dans notre cas, le système de quota pourra tout d'abord s'appliquer au système aquifère en imposant des quotas aux unités de pompage. Le système en place actuellement est un système de quota volume en eau sur une base annuel. Cependant, ce système est largement inopérant car l'Etat n'a pas mis en place une structure de contrôle suffisamment dissuasive. Les compteurs volumétriques ne sont pas toujours en place et la menace d'un contrôle est faible. Le système de quota temps est envisageable, tout au moins indirectement par le biais du rationnement de l'électricité à un coût beaucoup plus faible et une mise en place rapide. Ce qui nous intéressera donc ici est le système de quota temps d'électricité. Comme l'indique la littérature, on devra s'intéresser tout particulièrement aux biais que ce type de politique pourra induire : les forages seront affectés de manière différenciée en fonction de leurs débits.

Mais le système de quota pourra également se mettre en place au sein des puits collectifs. En effet, la collectivité pourra mettre en place un système de quota pour ses membres en tant que règle collective d'allocation de l'eau entre ses membres. Là encore, on pourra choisir entre un quota volume ou un quota temps ou un système mixte (temps, volume) de quota. On distinguera entre les quotas imposés *ex-ante*, dans ce cas le quota dont disposera un producteur ne dépendra pas des surfaces qu'il déclarera irriguer, et les quotas imposés *ex-post*, où le quota dont disposera le producteur dépendra des surfaces irriguées.

Les systèmes de quota sont mis en place dans un objectif d'équité, de diminution des risques d'approvisionnement (et de tour d'eau). La mise en place de quotas ne permet pas cependant d'obtenir l'efficience d'utilisation de la ressource.

2.2.1.3 Les marchés de l'eau

Le marché est un mécanisme d'allocation basé sur une répartition initiale des droits de propriété. Marché et appropriation privée de la ressource vont donc de pair. La confrontation entre offre et demande sur un marché, permet une allocation efficiente de la ressource entre les usagers à un prix d'équilibre établi sur un marché. La supériorité des marchés suppose cependant qu'un certain nombre d'hypothèses fortes soient vérifiées (Baland et Platteau, 1996 ; Strosser, 1997) :

- Les coûts de mise en place et de contrôle des droits de propriété sont nuls ou faibles, ce qui n'est pas respecté, par définition même des biens communs . Dans le cas d'un aquifère, la mise en place de concession de pompage et surtout du contrôle du respect de ces concessions montrent en effet que ces coûts administratifs sont importants.
- Les droits de propriété sont bien définis, c'est à dire sans ambiguïtés et pour contrôler toutes les externalités. Bhatia (1992) (cité dans Baland et Platteau, 1996) montre par exemple que la privatisation des puits conduit à la sur-exploitation des aquifères dans le Gujarat, on se trouve alors dans une situation digne d'une tragédie de l'accès libre.
- Les marchés sont compétitifs : le fonctionnement de marché suppose la présence d'un nombre important d'offreurs et de demandeurs, l'existence d'un système d'information efficace et des coûts de transactions faibles. Dans le cas de l'eau d'un aquifère, le nombre de participants au marché est forcément limité par les infrastructures d'irrigation. En d'autres termes, la vente d'eau ne peut être considérée que dans un rayon faible, car les coûts d'acheminement de l'eau sont rapidement prohibitifs, limitant ainsi la taille des marchés.
- Les autres marchés sont parfaits ou, au minimum, présents. L'absence de marché pour les capitaux dans un contexte de privatisation de la ressource amènera à exclure les agents ayant un moindre accès au capital. L'effet distributif de la privatisation est donc important. De plus, ces exclus peuvent résister à ce phénomène de privatisation (en ne respectant pas les nouveaux droits de propriété, par exemple), rendant ainsi le coût de contrôle et d'implémentation plus important. Par ailleurs, si le nombre de personne ayant accès aux nouveaux droits est faible, on

se rapproche d'un oligopsonne là encore non efficient.

Dans notre cas de figure, le non-respect de ces conditions fragilisent l'hypothèse de supériorité des marchés de l'eau, et rendent leur applicabilité improbable. Les marchés ne seront pas considérés comme instrument potentiel de contrôle de la demande en eau.

2.2.1.4 Conclusions sur les instruments de gestion

Parmi les instruments économiques d'intérêt pour notre problématique, nous avons relevé la tarification de l'eau sous ses différentes formes et les quotas. Ceux-ci sont difficilement applicables directement sur l'eau du fait de la difficile et coûteuse révélation des consommations réelles. L'idée ici est d'appliquer ces instruments aux consommations électriques des producteurs. Les consommations électriques des puits sont en effet un révélateur des consommations en eau. Il ne faudra pas négliger cependant que la profondeur de la nappe, et les équipements de pompage ne sont pas identiques en tous points. L'application d'instruments économiques sur des agents hétérogènes risque donc d'avoir des effets contrastés.

Ces instruments s'appliquent successivement aux deux échelles de l'étude. Premièrement, l'Etat applique une tarification ou des quotas au puits collectif. Les membres du groupe décident ensuite de règles d'allocation des coûts et de distribution de l'eau entre ses membres qui relèvent des mêmes logiques (tarification volumétrique ou non-volumétrique, quotas horaires ou de superficie).

Par ailleurs, la plupart de ces instruments, notamment la tarification, ont été utilisés plus dans une optique de maintien des infrastructures d'irrigation que de gestion réelle de la demande. Ce ne sera pas notre optique ici.

Enfin, beaucoup de ces études font abstraction des externalités et des relations stratégiques entre les utilisateurs d'une même ressource. Le caractère de bien en propriété commune et ses implications seront abordées ultérieurement.

2.2.2 La gestion des biens en propriété commune

2.2.2.1 Introduction

Notre question de recherche peut également se rattacher à la vaste littérature qui s'intéresse aux décisions d'action collective (Olson, 1965 ; Ostrom, 1990). En effet, cette dernière s'intéresse aux choix, collectifs et individuels, de plusieurs acteurs qui doivent se coordonner pour partager une ressource commune, et gérer au mieux les externalités, positives ou négatives, engendrées par leurs actions individuelles.

Deux grandes voies existent pour représenter les choix stratégiques d'agents en interaction. La première repose sur la théorie des jeux, développée depuis la deuxième moitié du 20^{ième} siècle. La deuxième, plus récente car les premières applications sont apparues dans la fin des années 80, se base sur les avancées l'intelligence artificielle distribuée et la simulation de systèmes complexes par le biais de modèles multi-agents.

2.2.2.2 Modélisation multi-agents

De manière générale, les systèmes multi-agents (ou SMA) sont des systèmes virtuels composés de divers éléments : un environnement, un ensemble d'objets, généralement situés, un ensemble d'agents, un ensemble de relations qui unissent des objets entre eux, un ensemble d'opérations qui permettent aux agents de percevoir, consommer et manipuler les objets, et des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification (Ferber, 1997).

De manière plus spécifique, ils peuvent être employés pour représenter la gestion des biens en propriété commune. Ils permettent alors de modéliser les interactions entre dynamiques de fonctionnement de la ressource et dynamiques sociales (interactions entre agents). Ils permettent également de prendre en compte les règles d'accès des agents à la ressource, et les interactions mutuelles lors de l'utilisation de cette ressource. Les SMA s'avèrent donc particulièrement intéressants pour la simulation des formes de coordination observées sur les ressources communes.

L'utilisation des systèmes multi-agents est à rapprocher des théories évolutionnistes, qui cherchent à comprendre le fonctionnement des agents éco-

nomiques à partir d'une approche de type « bottom-up ». L'inclusion de l'hétérogénéité des agents, des processus d'apprentissage, et d'interactions répétées, apporte beaucoup de réalisme aux simulations effectuées mais également toute la complexité et l'intracabilité des systèmes économiques réels².

La modélisation multi-agents donne un cadre d'analyse des systèmes économiques complexes en modélisant :

- les actions et les interactions des agents de manière discrète et répétée, et non pas comme résultant d'un équilibre statique ;
- des agents qui adoptent/adaptent continuellement des nouvelles stratégies en réponse à un environnement incertain et changeant (du fait des décisions antérieures) ;
- des agents qui sont dotés d'une rationalité limitée, et parfois d'une capacité limitée dans la perception et le traitement des informations. Des règles de fonctionnement ad-hoc sont donc la règle, plutôt que des comportement d'optimisation ;
- les actions et les interactions répétées entre les agents utilisant des règles simples (« rules of thumb ») qui permettent l'émergence, aux échelles supérieures, de phénomènes complexes.

Les SMA ont été employés dans de nombreuses disciplines, biologie, chimie, physique, sciences sociales, où l'objectif était de comprendre la complexité sous-jacente et les propriétés émergentes d'un système en action.

Plusieurs études portant sur la question de la gestion de ressources naturelles ou sur les interactions hommes/ressources se sont basées sur les SMA. Ces expériences ont montré l'intérêt de tels outils pour mener des recherches sur les interactions entre ressources et usages. Bousquet (1994), à partir de l'étude des pêches dans le Delta Central du Niger, a ainsi mis en avant l'intérêt de la modélisation des représentations pour l'étude des relations entre hommes et ressource. De même, la représentation des relations sociales dans un système irrigué virtuel, mais issu d'observations effectuées dans la vallée du Sénégal, Barreteau et Bousquet (2000) ont étudié les conditions de viabilité des systèmes irrigués de cette vallée.

Cependant, notre objectif ne sera pas ici de contribuer à cette littéra-

²De ce point de vue, les SMA paraissent assez incompatibles avec les méthodes de la science économiques qui essaient justement de s'extraire de la complexité du monde réel pour obtenir des relations identifiables

ture, mais plutôt de s'inspirer de celle-ci. En effet, nous ne nous intéresserons pas aux conditions d'émergence des règles de fonctionnement au sein des groupes³. Plutôt, notre problème sera de connaître les conséquences sur les différents acteurs de l'apparition ou de la modification d'une règle à l'intérieur d'un groupe, sous différents régimes de tarification électrique. Les outils de la théorie des jeux, et sur la formation des prix au sein des marchés oligopolistiques nous ont donc paru plus adéquats.

2.2.2.3 Théorie des jeux

La théorie des jeux propose un cadre cohérent pour analyser les choix stratégiques d'agents rationnels en interactions (Gibbons, 1992).

L'exemple le plus connu, et le plus critiqué, de la théorie des jeux appliquée à la gestion des ressources naturelles est le papier de Hardin (1968). Hardin présente l'utilisation de la ressource en *accès libre* sous la forme d'une configuration du dilemme du prisonnier, où la seule issue possible est la non-coopération entre les joueurs, menant ainsi irrémédiablement à sa dilapidation.

Cependant, la propriété commune et l'accès libre ont souvent été confondus dans la littérature. Ces deux situations sont cependant très différentes dans leur nature et dans les outils analytiques à mobiliser. Sous le régime de propriété commune, il existe un droit d'exclusion qui est donné à un groupe bien défini, alors qu'en accès libre le droit d'inclusion est donné à tous les agents. Du fait de la possibilité d'exclusion, les agents vont pouvoir interagir stratégiquement. Dans le cas de l'accès libre, les agents estiment que le résultat final est indépendant de leurs propres décisions, dans le cas de la propriété commune, les agents estiment que leur propre décision aura une influence sur le résultat final, et donc va induire une réaction de la part des autres agents.

De nombreux auteurs ont donc re-travaillé sur le modèle de Hardin (Ostrom *et al.*, 1994; Baland et Platteau, 1996; pour une revue récente de la littérature voir également Faysse, 2001b; Faysse, 2001a). Ces travaux s'intéressent pour la plupart aux conditions qui pourraient permettre l'émergence de la coopération comme situation d'équilibre. Pour cela plusieurs directions

³Il s'agirait là d'un sujet complémentaire au sujet traité ici

ont été prises : (a) type d'interaction stratégique, en remettant en cause le dilemme du prisonnier sans communication, et sans répétition comme schéma unique d'interactions, (b) hétérogénéité des groupes et apparition de la coopération, (c) répétition dans le temps des interactions, (d) existence de normes, (e) interactions avec le régime de propriété, et distinction entre accès libre et propriété commune.

Position par rapport à la littérature sur la propriété collective Par rapport à la littérature théorique sur la gestion des ressources en bien commun et la propriété collective, on se positionne dans un cadre relativement simple : le jeu non-coopératif sans répétitions avec information parfaite. On n'attend donc pas de résultats théoriques nouveaux de notre travail de modélisation pour la théorie des jeux.

Nous n'aborderons pas la négociation et la genèse des règles et des institutions au sein des puits, qui devrait faire appel à la théorie des jeux coopératifs. Nous nous plaçons en aval de ces négociations, et analysons l'impact de ces règles sur les comportements individuels des producteurs du groupe.

Par rapport à la littérature cependant, nous proposons une modélisation d'un jeu à n joueurs appliquée à une situation réelle de production. Les stratégies des producteurs, habituellement simplifiées et présentées sous forme de tableau de gains simple, correspondront donc à des choix de cultures et de choix de techniques représentés à partir de modèles d'exploitation. Il ne s'agit donc pas tant de rechercher un résultat théorique nouveau que d'appliquer la théorie des jeux existante à un cas complexe.

2.2.3 La formation des prix sur les marchés oligopolistiques

L'oligopole de Cournot comme modèle de référence L'oligopole de Cournot, dans sa version la plus simple, représente un nombre fini et petit de producteurs en compétition sur un marché de produits homogènes. Les consommateurs, supposés passifs, sont représentés par une fonction de demande agrégée ou par une fonction de demande inverse. Les producteurs choisissent les quantités de produits à mettre sur le marché. L'agrégation des offres des producteurs constitue la fonction d'offre qui sera confrontée à la

demande. Le nombre des producteurs est suffisamment faible pour que les décisions d'un producteur aient un impact sur les revenus des autres producteurs.

Ainsi défini, l'oligopole de Cournot est un jeu non-coopératif, où l'espace des stratégies est représenté par des quantités de production, et l'espace des gains est constitué des marges pour chacun des joueurs. L'équilibre de Cournot-Nash est l'équilibre de Nash correspondant à ce jeu.

Un jeu de Cournot-Nash est donc caractérisé par un ensemble d'agents en interactions stratégiques sur un marché. Le terme d'interactions stratégiques entre producteurs signifie que, contrairement aux situations de marchés parfaits, le nombre des producteurs est suffisamment faible pour que les décisions de l'un d'entre eux aient une influence sur les décisions des autres.

Dans le cas, de jeux statiques à information parfaite, chaque joueur optimise ses profits, en faisant l'hypothèse que chacun des membres fera de même. L'équilibre définit alors un ensemble d'offres telles que chaque producteur pris séparément ne désire pas changer sa propre solution de manière unilatérale. Modéliser un tel équilibre demande de prendre en considération, et de manière séparée, les objectifs de chacun des producteurs. La résolution d'un équilibre de Cournot-Nash peut donc se résumer à la résolution simultanée des problèmes d'optimisation de chacun des producteurs agissant individuellement.

La présence d'interactions stratégiques interdit de représenter le jeu par une fonction objectif qui serait la somme des fonctions d'utilité de chacun des agents. En effet, cela serait implicitement reconnaître une coopération parfaite entre les différents producteurs. En l'absence d'une fonction objectif unique à optimiser, la résolution de ce système est donc impossible avec les méthodes d'optimisation classiques.

La « structure-type » de l'oligopole de Cournot, peut aisément se transposer, avec quelques aménagements, à la situation de nos puits collectifs : chaque producteur achète son eau sur un pseudo-marché de l'eau où, du fait des fonctions de répartition des coûts, le prix de l'eau dépend des décisions de consommation de l'ensemble du groupe (cf. chapitre 4). Nous nous sommes donc largement inspirés de la littérature sur les oligopoles.

Modélisation des marchés oligopolistiques Les jeux non-coopératifs pour l'analyse de marchés non-compétitifs ont été développés par divers auteurs. Les méthodes de modélisation employées sont d'ailleurs assez semblables aux méthodes évoquées lors de la modélisation de l'utilisation des biens en propriété collective. En effet, on retrouve d'une part des méthodes basées sur une recherche itérative d'un équilibre à partir de jeux répétés, d'autres part les méthodes mathématiques de recherche d'un équilibre statique en jeu non répété.

Processus itératifs et modélisation multi-agents La recherche d'équilibre de marché peut tout d'abord s'opérer par le biais de méthodes heuristiques qui, grâce à un processus itératif, permettent de déboucher sur un équilibre stable.

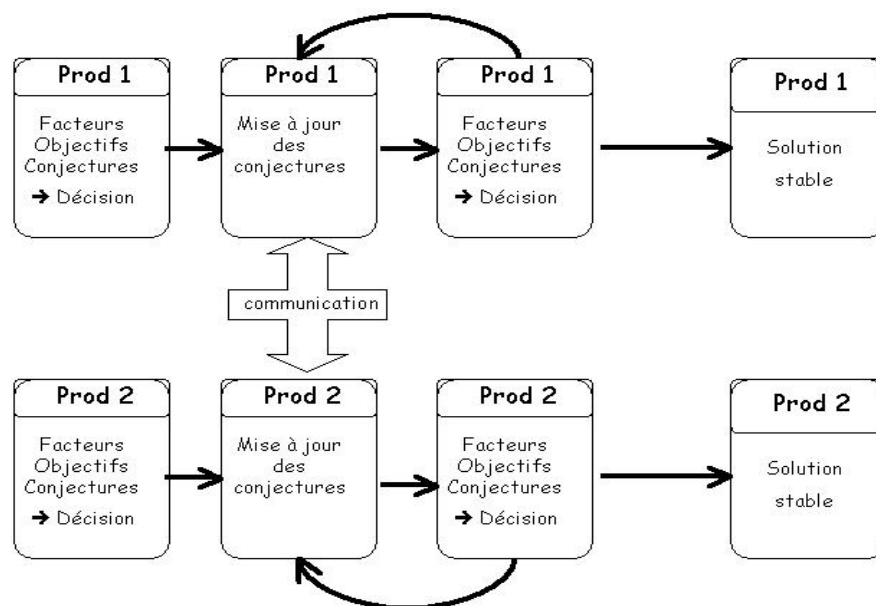


FIG. 2.3 – Processus itératif de recherche de l'équilibre de marché

Cournot lui-même a proposé un processus de tâtonnement pour l'atteinte d'un équilibre. Dans ce processus, les firmes en compétition ajustent de manière séquentielle les quantités produites, en réaction aux offres de leurs compétiteurs lors des périodes précédentes. Les firmes réagissent de manière myope aux choix antérieurs des autres firmes, i.e. sans anticiper leurs choix

futurs.

Theocharis (1960) montre que dans le cas d'oligopoles avec plus que deux agents, et des fonctions de demande et d'offre linéaires, les processus de tâtonnement ne convergent pas. S'il y a trois firmes, on observe une oscillation autour de plusieurs équilibres, s'il y a quatre firmes ou plus on observe des fluctuations divergeant progressivement.

Parmi les exemples les plus récents, Borenstein et Bushnell (1997) utilisent ce type de méthode pour l'évaluation du marché de l'électricité Californien sous l'effet d'une dérégulation. Ils utilisent le cadre théorique de l'équilibre de Cournot (stratégies par les quantités). Pour ce faire, ils développent un algorithme qui calcule de manière itérative les quantités optimales produites par chacune des firmes quand les productions des autres compétiteurs sont maintenues constantes. Le processus itératif est répété jusqu'à ce qu'aucunes des firmes n'ait intérêt à changer sa production étant donnée la production des autres (Figure 2.3).

Plus récemment, Chuang *et al.* (2001) utilisent le même genre de procédures itératives pour modéliser les décisions de production et d'investissement dans un marché électrique oligopolistique.

Dans le domaine de l'eau, Faysse (2001a) a développé un algorithme itératif, couplé avec un modèle de bilan hydrique qui permet de trouver un équilibre de Nash dans des petits périmètres irrigués.

Les SMAs ont également été utilisés dans le domaine des marchés électriques. Day (1999) modélise l'équilibre des fonctions d'offre proposé par Klemperer et Meyer (1989), par un SMA. Day modélise des jeux répétés où chaque agent fait l'hypothèse, lors de sa prise de décision, que les autres agents auront le même comportement que dans le jeu précédent. Quand ce jeu est répété dans le temps, le modèle permet de reproduire des comportements stratégiques complexes très proches de la réalité observée sur le marché de l'électricité anglais (Pool of England and Wales).

Dans le même ordre d'idée, Bower, Bunn et Wattendrup (2001) ont simulé le marché électrique Allemand à l'aide d'un modèle multi-agents. Ils peuvent ainsi analyser les comportements de consolidation entre firmes fournisseuses d'électricité. Ils concluent que les rachats successifs augmentent le pouvoir de marché des firmes et conduit à une augmentation des prix de l'électricité. Cependant, leur modèle est apparemment très sensible aux décisions exogènes

(abandon du nucléaire par exemple). Ces méthodes ouvrent également la voie vers une modélisation aux jeux répétés et spatialisés.

On retiendra que les méthodes de résolution basés sur des processus itératifs ont l'avantage de laisser au modélisateur une liberté importante quant à la description de l'environnement physique souvent complexe de production. Ils peuvent cependant s'avérer délicats à calibrer, et à faire converger vers un équilibre. Ce n'est pas la solution que nous avons retenue.

Recherche directe d'équilibre L'autre alternative utilisée consiste à utiliser les méthodes algorithmiques permettant la recherche directe d'un équilibre statique (jeu non-répété). Murphy *et al.* (1986) montrent comment on peut utiliser la programmation mathématique pour déterminer des équilibres sur un marché oligopolistique. Mais la littérature récente sur les structures de marché oligopolistiques se concentre sur l'évolution des marchés de l'électricité sous l'impact de la dérégulation.

Jing-Yuan et Smeers (1999) modélisent le marché Européen de l'électricité sous l'hypothèse de la dérégulation et d'une structure oligopolistique. Lise, Kemfert et Tol (2003) se sont également intéressés au marché de l'électricité allemand et ont développé un modèle oligopolistique en utilisant spécifiquement une formulation de type MCP⁴. Leur papier s'intéresse à l'impact attendu du processus de libéralisation sur l'environnement. Ils modélisent donc les différentes options stratégiques que peuvent prendre les fournisseurs d'énergie dans un marché libéralisé. Les simulations montrent quand les producteurs agissent de manière non-coopérative, l'impact environnemental est positif, mais les prix de l'électricité augmentent.

Finalement, Ventosa *et al.* (2000a; 2000b) développent un modèle de marché électrique oligopolistique avec présence d'incertitudes pour étudier les investissements des firmes électriques espagnoles. Pour pouvoir gérer des problèmes, par nature, de grande taille, ils ont travaillé sur des modèles de type « stochastic dynamic programming » afin de décomposer le problème en sous-modèles séparables. Chaque sous-modèle est alors développé avec la formulation MCP.

Dans chacun des cas, les auteurs soulignent la robustesse des résultats obtenus et la relative souplesse d'écriture des modèles. C'est donc la solution

⁴Nous donnerons une présentation détaillée et complète dans le chapitre 7.

que nous avons retenue.

2.2.4 La modélisation bio-économique

Notre dernière source d'inspiration viendra des applications utilisant la modélisation bio-économique comme description des systèmes de production agricole. Cette école plus méthodologique que théorique a déjà travaillé dans différents domaines de la gestion des ressources naturelles. Les applications se sont intéressées aux diverses ressources utilisées par l'agriculture : les sols (Deybe, 1993 ; Barbier, 1994), la qualité de l'eau (Flichman *et al.*, 1994 ; Boussemart *et al.*, 1995 ; Flichman, 1995 ; Jourdain, 1995 ; Flichman et Jourdain, 1998), et les quantités d'eau (Bouzaher *et al.*, 1993 ; Varela-Ortega *et al.*, 1998 ; Bontemps et Couture, 1999).

Les modèles bio-économiques d'estimation de la demande en eau agricole s'appuient essentiellement sur la théorie micro-économique standard : la demande en eau par type d'exploitation est calculée à partir des besoins en eau des cultures ajustés à un objectif de production, le modèle d'exploitation étant calé pour expliquer le choix d'assolement des exploitations, en fonction des disponibilités en terre, en main d'œuvre permanente et en eau afin de maximiser la fonction d'utilité du décideur, sous l'hypothèse de rationalité des choix des agriculteurs. Les besoins en eau des cultures ne sont pas modélisés par des fonctions de production classiques, mais proviennent de modèles agronomiques sophistiqués qui prendront en compte les interactions plante-milieu de manière beaucoup plus fine (voir entre beaucoup d'autres Semaan, 2001).

Pour prendre en compte l'hétérogénéité des exploitations, qui entraîne une diversité des comportements, plusieurs types d'exploitations sont souvent distingués. Eventuellement, des processus d'agrégation plus ou moins complexes permettent d'appliquer ces modèles à des échelles diverses (Rieu et Gleyses, 1993 ; Gérard *et al.*, 1994). Ces modèles peuvent intégrer les risques, la diversité des pratiques d'irrigation, mais ils ne rendent pas en général pas compte des interactions locales entre les systèmes de production. Par exemple, l'impact réciproque de deux agriculteurs exploitant une même ressource ne peut être traité avec la modélisation bio-économique.

Ces modèles sont à distinguer des modèles d'action (Sebillotte et Soler,

1998). Ces derniers permettent de formaliser les tactiques à l'origine de la demande en eau sur une exploitation à un pas de temps très fin (en général journalier), en représentant de manière explicite les règles d'organisation du travail des producteurs. Ces modèles paraissent en effet mieux adaptés à l'aide au pilotage de l'irrigation pour des exploitations individuelles (Lamacq, 1997) qu'à la représentation de système de production complexe en interactions en vue d'une analyse de politique.

2.3 Conclusions

Notre objectif était de présenter, avec le moins d'ambiguïté possible, notre problématique : l'impact sur les systèmes de production agricole des politiques économiques visant une réduction de la consommation en eau d'irrigation.

Nous avons pu également percevoir qu'il était important de situer l'échelle à laquelle s'adresse notre travail. Nous avons effectivement plusieurs systèmes emboîtés sur lesquels les politiques appliquées auront peut-être des implications différentes. Par exemple, l'instrument quota peut être employé par l'Etat au niveau de chaque puits. En retour, chaque puits collectif pourra imposer à chacun des systèmes de productions un quota d'extraction. Le même instrument peut donc être étudié à deux échelles différentes.

Pour traiter cette question, nous nous sommes positionné par rapport à la littérature économique abondante sur le sujet. Nous ferons donc des emprunts aux travaux théoriques et empiriques de quatre écoles. La première s'intéresse à l'impact des instruments de gestion de l'eau. La deuxième correspond aux travaux de modélisation bio-économique, qui pour un meilleur réalisme des réalités agricoles utilise les résultats des modèles agronomiques pour décrire les options à la disposition des producteurs. *Last but not least*, la théorie des jeux et la formation des prix sur les marchés oligopolistiques ont également été mobilisées pour représenter les interactions stratégiques entre producteurs.

Après cette présentation certes non-exhaustive de la littérature sur laquelle nous fonderons notre travail, nous nous attacherons successivement à présenter en détail la diversité des fonctionnements des puits collectifs observés. Nous développerons ensuite progressivement un modèle qui nous permettra de présenter de manière explicite les choix opérés.

Deuxième partie

Les puits collectifs et leur modélisation

Chapitre 3

Vers la représentation des puits collectifs : bases empiriques

3.1 Introduction

Le travail de thèse repose sur deux processus, l'un d'observation empirique et l'autre de modélisation, qui seront présentés ici de manière séquentielle, mais qui durant le travail de recherche ont été menées de manière parallèles (le premier processus ayant alimenté le second et vice-versa).

Dans ce chapitre, après une description de la méthodologie générale, nous exposerons les résultats obtenus sur le fonctionnement des puits collectifs et des systèmes de production, résultats des diverses collectes d'information réalisées. Ces informations ont servi de bases empiriques aux travaux de modélisation présentés dans les chapitres ultérieurs.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Deux échelles imbriquées

Le travail empirique a consisté à observer de manière détaillée un certain nombre de systèmes. Le mot système est ici volontairement ambigu puisqu'on s'intéresse à deux types de systèmes différents relevant d'échelles de travail différentes et imbriquées. Rappelons qu'un système est *un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé en fonction d'un but*. On cherchera

donc à définir, avec le plus de précision possible, (a) les limites des systèmes observés, (b) leurs éléments constitutifs, et (c) les interactions entre ces différents éléments et avec le monde extérieur.

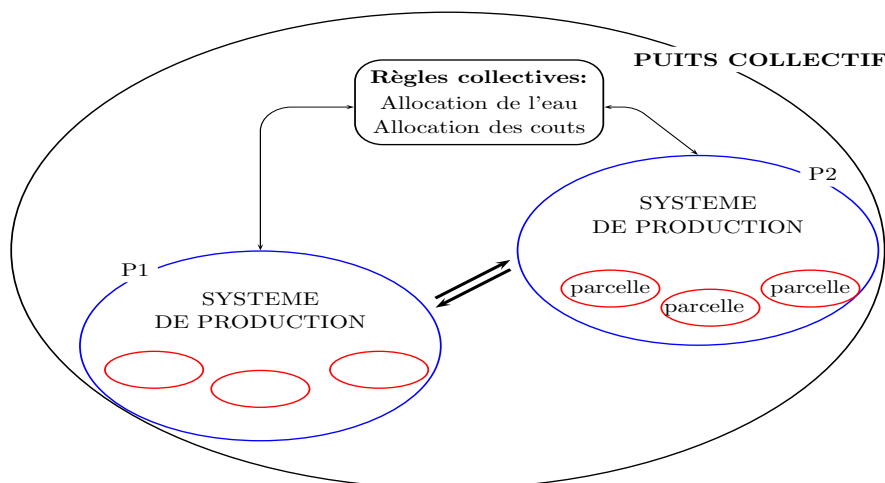


FIG. 3.1 – Représentation schématique d'un puits coopératif.

Les premiers systèmes observés sont les puits collectifs. Ce sont leurs réactions aux politiques agricoles qui seront étudiées, il est donc important d'appréhender leur diversité et leurs modes de fonctionnement respectifs. Les puits collectifs sont vus comme des *systèmes irrigués*. On entend par-là que le système comprend non seulement la structure physique (le puits, les canaux, etc.), mais également les membres du groupe qui gèrent la ressource et les règles, formelles ou informelles, dont les membres se servent pour gérer le système.

Les membres du groupe sont des producteurs gérant des systèmes de production. Un système de production étant défini comme un ensemble structuré de moyens de production - force de travail, terre, équipement, ... - combinés entre eux pour assurer une production, végétale et/ou animale, en vue de satisfaire les objectifs des responsables de la production. Le deuxième type de systèmes observés est donc le système de production, constituant de base des groupes. Là encore, il existe une certaine diversité des systèmes de production qu'il est important de comprendre et de détailler. Un échantillon de producteurs au sein de chaque groupe a donc été analysé.

3.2.2 L'échantillonnage

3.2.2.1 Stratification régionale

L'utilisation combinée des systèmes d'information géographiques disponibles dans la région (Martinez-Romero *et al.*, 2001) et des observations directes du paysage nous ont permis, dans une phase préliminaire, de délimiter les grandes zones agro-écologiques de l'Etat du Guanajuato (Jourdain *et al.*, 2001a; Hodson *et al.*, draft).

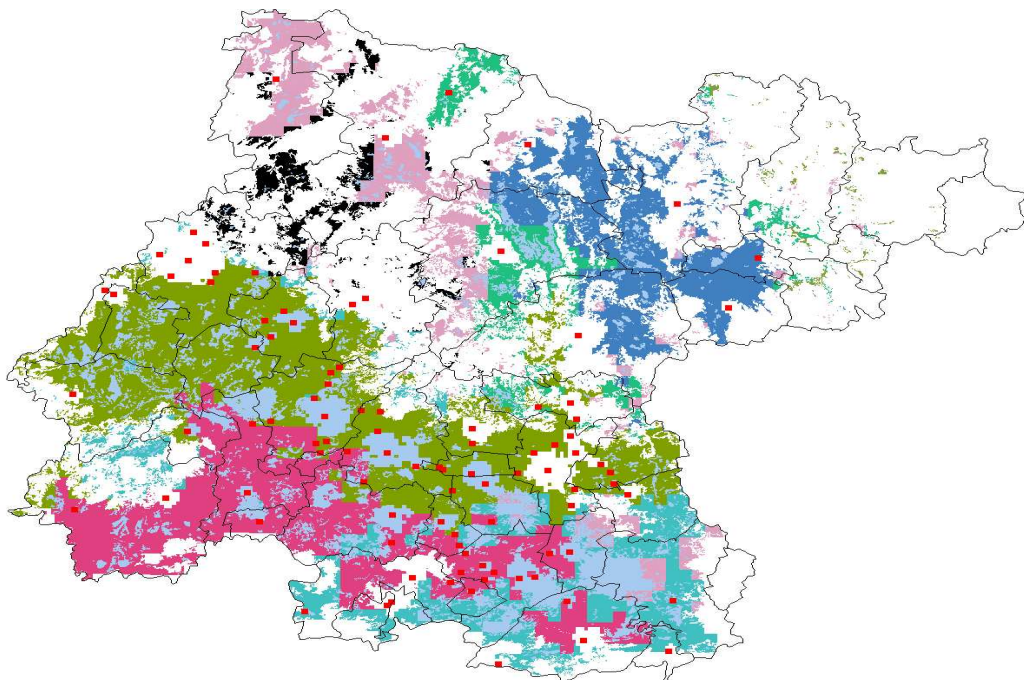


FIG. 3.2 – Zonage agro-écologique de l'Etat de Guanajuato.

Sans reprendre complètement cette étude, les méthodes statistiques multivariées, nous ont permis de distinguer 8 zones agro-écologiques contrastées (Figure 3.2). Nous avons concentré nos activités de recherche, dans la zone connue sous l'appellation de Bajío (Section 1.6.1, page 21). En effet, c'est là que l'on trouve les zones irriguées les plus importantes de l'Etat.

Nous avons choisi quatre zones géographiques couvrant des situations contrastées en terme d'approvisionnement en eau : deux zones comprises à l'intérieur de modules d'irrigation de surface : zone de Valle de Santiago et de Huanimaro, deux zones hors des modules d'irrigation de surface : zone de Penjamo (Ouest) et de Quiriceo (Valle, hors module) (Figure 3.3).

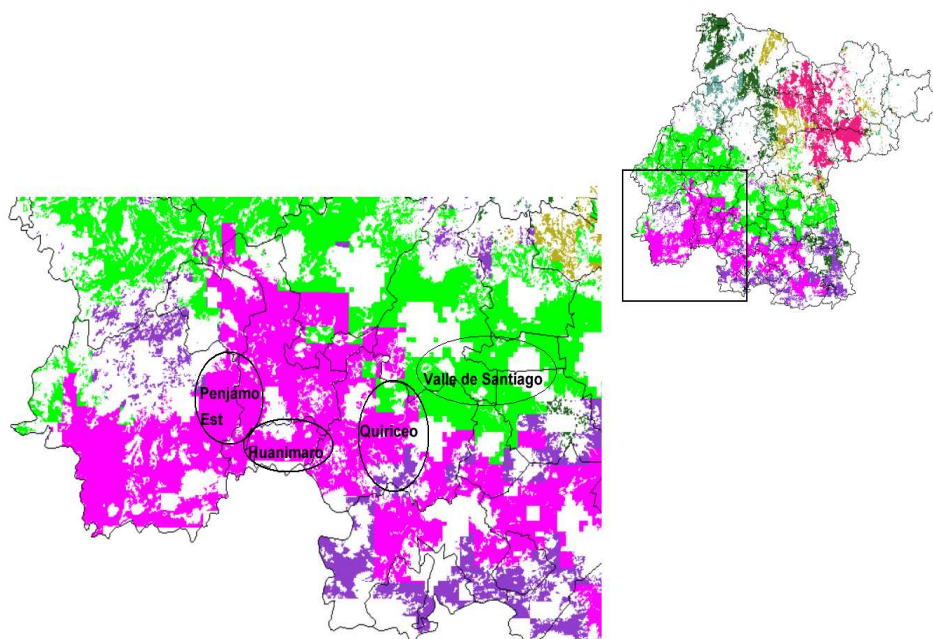


FIG. 3.3 – Zones d'échantillonnage.

3.2.2.2 Echantillonnage des communautés et des puits gérés par des collectivités

Vingt communautés ont été choisies aléatoirement parmi l'ensemble des communautés existantes dans ces quatre zones. Dans chaque communauté, deux puits collectifs par communauté ont été visités. Nous disposons donc d'un échantillon de 40 puits collectifs.

Une enquête semi-fermée avec les représentants de chacun de ses puits a été réalisée (pour plus de détails, consulter le guide d'enquête en annexe C, page 319). Lors de ces enquêtes, une liste exhaustive des membres du puits fut également réalisée. A partir de cette liste exhaustive, deux producteurs par puits ont été sélectionnés et visités pour connaître plus en détails les caractéristiques des systèmes de production¹.

Nous disposons donc des données de 80 producteurs appartenant à des puits collectifs. Les grands points de la méthode sont repris dans la figure 3.4.

¹Ces enquêtes rapides sont complémentaires d'enquêtes détaillées réalisées en début de projet (Barry, 2001 ; Carrère, 2001b ; Jourdain *et al.*, 2001b)

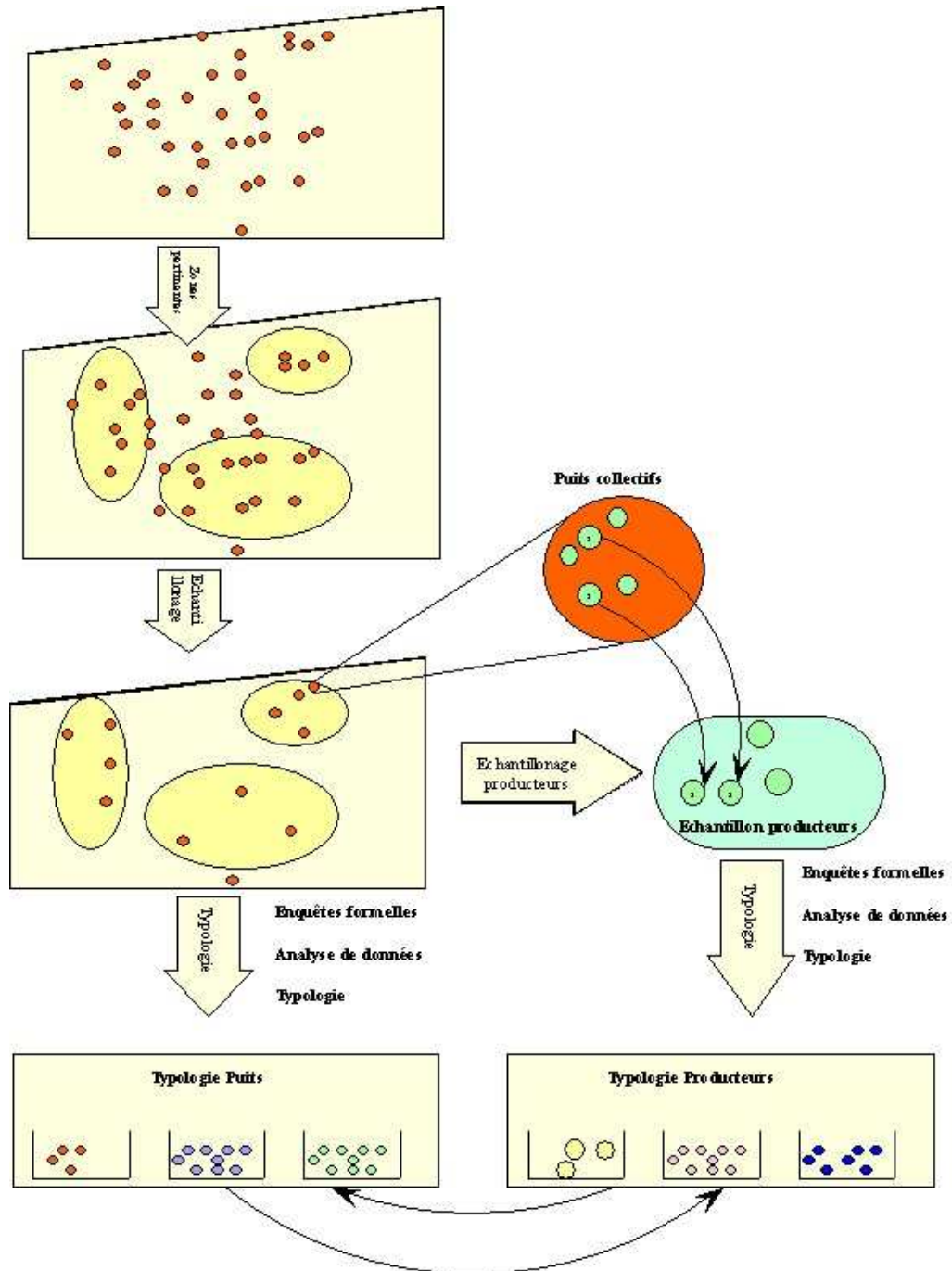


FIG. 3.4 – Echantillonnage des systèmes observés

3.3 Statistiques des puits visités

Cette section repose sur une analyse descriptive des données d'enquêtes réalisées auprès des 40 puits collectifs. Certaines enquêtes ayant été jugées non traitables, nous avons un effectif final de 36 puits valides.

3.3.1 Critères de taille

Le nombre de membres constituants est une première information intéressante sur les groupes. La littérature montre que la coopération au sein des groupes est souvent meilleure au sein des groupes à faible effectif (Olson, 1965; Ostrom, 1992). Dans notre échantillon, la taille des groupes est relativement faible avec, en moyenne, une dizaine de membres, sachant que la majorité des groupes ont entre 4 et 15 membres. La taille des groupes favoriserait donc une bonne coopération au sein des groupes.

Un deuxième critère de taille est la superficie irriguée déclarée auprès de la Comisión Nacional de Agua (CNA) (*STHE*, mesurée en hectare). Cette superficie correspond à une valeur purement théorique et *a priori* corrélée au débit du puits. En effet, lors de l'attribution de la concession, la CNA applique une règle simple de 1 hectare par l/s. Dans notre échantillon, la superficie théoriquement irriguée est de 40 hectares en moyenne et ne dépasse pas 50 hectares.

Cependant les producteurs peuvent décider d'irriguer moins, quand les conditions économiques ne s'y prêtent pas ou quand le débit du puits a considérablement baissé. Ils peuvent également irriguer plus, en irriguant des parcelles adjacentes au puits et qui ne devraient pas *théoriquement* recevoir d'eau en provenance de ce puits. C'est pourquoi nous nous intéressons à la superficie réellement irriguée durant l'hiver 2002/2003 (*SIRR*, mesurée en ha). La moyenne des superficies réellement irriguées en hiver est un peu inférieure à la surface théorique pour les raisons évoquées précédemment. D'une manière générale, les surfaces irriguées en hiver sont plus faibles que celles irriguées en été. Durant le cycle d'été, une ou deux irrigations seulement étant réalisées, il n'existe pas vraiment de contraintes de tour d'eau, les agriculteurs ont alors tendance à irriguer sur des superficies plus importantes que la superficie théoriquement irrigable. Par ailleurs, la superficie réellement irriguée

durant le cycle d'hiver 2002/2003 est beaucoup plus variable car dans certains puits, de nombreux producteurs n'ont pas semé. Les deux causes principales sont : (a) l'automne 2002 a été anormalement pluvieux, ce qui a retardé la préparation des semis d'hiver et les irrigations. Les producteurs n'ayant pas reçu la main d'eau avant le 15 janvier ont décidé, pour la plupart, de ne pas implanter de cultures dans le cycle d'hiver, (b) pour certains producteurs, la production de céréales d'hiver n'est plus rentable, ils n'implantent donc plus de cultures durant ce cycle.

Le débit des puits (*Debit* mesuré en l/s) est, en moyenne, de 32 l/s. Mais ce critère utilisé seul cache une grande diversité de situations par rapport aux possibilités d'utilisation de l'eau par les différents membres. Pour obtenir un critère plus concret de pression d'utilisation de l'eau, nous avons développé un indicateur de longueur théorique du tour d'eau (*TET*, mesurée en jours). Celui-ci correspond à la longueur du tour d'eau, si l'on voulait irriguer toutes les surfaces avec une lame d'eau de 2.500 mm². Cela correspond à la longueur d'un tour d'eau pour un groupe qui désirerait semer uniquement des céréales avec les lames d'eau actuellement en pratique. Celui se calcule aisément par le biais de la formule, $TET = \frac{STHE \cdot 2500 \cdot 1000}{Debit \cdot 24 \cdot 3600}$. Avec une durée supérieure à 30-35 jours, on pourra voir apparaître des problèmes entre les producteurs pour terminer le tour d'eau. Comme nous l'avons dit précédemment, cette mesure devrait être quasi-identique entre les différents groupes, du fait du processus d'attribution des concessions d'extraction par la CNA. En effet, si on calcule le TET avec une dotation initiale de 1 l/s/ha, on obtient un tour d'eau de 29 jours. Cependant on observe une grande variabilité dans le TET réellement observé. Cette variabilité peut provenir d'une évolution à la baisse du débit des puits du fait de la baisse continue des nappes phréatiques et de l'usure des équipements de pompage. Avec une baisse du débit du puits le nombre de jours nécessaires pour irriguer la totalité des surfaces augmente.

Si on calcule un indice similaire mais en prenant en compte la superficie réellement irriguée durant l'hiver 2002/03, nous obtenons le tour d'eau théorique par rapport à la surface réelle (*TETR*, également mesuré en jours). Logiquement, la plupart des groupes ont un tour d'eau théorique par rapport à la surface réelle compris entre 30 et 40 jours, ce qui montre que les

²Cette lame d'eau de 2.500 mm, qui pourrait apparaître importante, correspond aux lames d'eau moyennes appliquées durant les irrigations dans la région

groupes ont bien intégré la contrainte de tour d'eau. Certains puits ont des situations plus confortables leur permettant ainsi de pouvoir arrêter périodiquement leur puits entre les irrigations même durant les périodes critiques, et de donner une certaine flexibilité à leur tour d'eau. Par contre, certains puits ont des tours d'eau qui vont bien au-delà d'un tour d'eau théorique de 40 jours. L'observation des 10 puits pour lesquels ce phénomène apparaît montre que lorsque ce tour théorique est démesurément important, une partie de la superficie est réservée à des cultures peu demandeuses en eau comme le pois-chiche. Le pois-chiche demande une seule irrigation légère en début de saison.

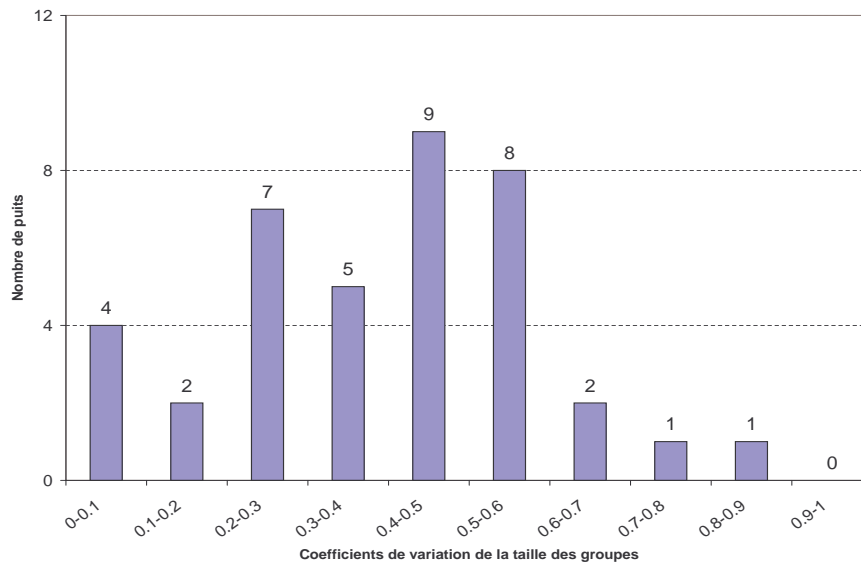


FIG. 3.5 – Histogramme des coefficients de variation de taille

La superficie moyenne en propriété (SMP , mesurée en hectare) correspond au ratio entre la superficie théorique et le nombre de membres du groupe. Les superficies moyennes contrôlées par chacun des membres des groupes sont relativement faibles, avec une moyenne de 4,3 hectares par membre. De plus les superficies moyennes au sein des groupes varient peu autour de cette moyenne, la majorité des groupes oscillant entre 3 et 7 ha en moyenne par membre du groupe. Mais cette superficie moyenne cache parfois une grande hétérogénéité au sein des groupes. Le coefficient de variation des

superficies en propriété au sein d'un groupe a donc été utilisé pour évaluer cette hétérogénéité (Figure 3.5).

On constate une distribution quasi-normale des coefficients de variations des groupes. La grande majorité des groupes ayant un coefficient de variation compris entre 0,3 et 0,6, révélant une grande disparité dans la répartition des terres au sein des groupes. Cette disparité peut être due à une attribution initiale non égale, chacun des membres cultive dès le départ une superficie différente au sein des groupes ou à une division différentielle des terrains en propriété.

3.3.2 La valorisation de l'eau : diversification des cultures

Nous avons relevé les cultures implantées durant le cycle d'hiver 2002/2003 dans les puits enquêtés. Durant le cycle d'hiver, on trouve quatre grands types d'activités agricoles. La majorité des superficies est occupée par des céréales, blé et orge (80% des superficies développées). D'autres cultures sont cependant présentes au niveau de ces puits. En moyenne, les cultures horticoles, et les fourrages (essentiellement la luzerne) occupent environ chacun 10% des superficies.

Cependant, ces moyennes cachent une grande variabilité des situations.

Dans la majorité des cas, les puits collectifs comportent une part minime de cultures fourragères. Cela correspond aux situations où certains producteurs disposent de placettes réduites avec de la luzerne afin de maintenir quelques animaux. Ainsi, vingt-quatre puits sur quarante ont une proportion de fourrage inférieure à 5% de la sole emblavée. Mais, dans trois puits (7% des cas) les superficies en fourrage dépassent trente pour cent de la superficie emblavée. Les treize puits restant (32% des cas) comporte des superficies non négligeables de luzerne, comprises entre cinq et trente pour cent de la sole emblavée.

On constate le même phénomène pour les cultures horticoles. Une grande majorité des puits ne cultivent aucunes ou une part mineure de cultures horticoles (moins de 5% de la sole). Mais on constate la présence d'une dizaine de puits où les cultures horticoles prennent une importante de la sole (entre 5 et 30% de la sole d'hiver).

Pour réaliser une comparaison de la valorisation de l'eau par les puits, on

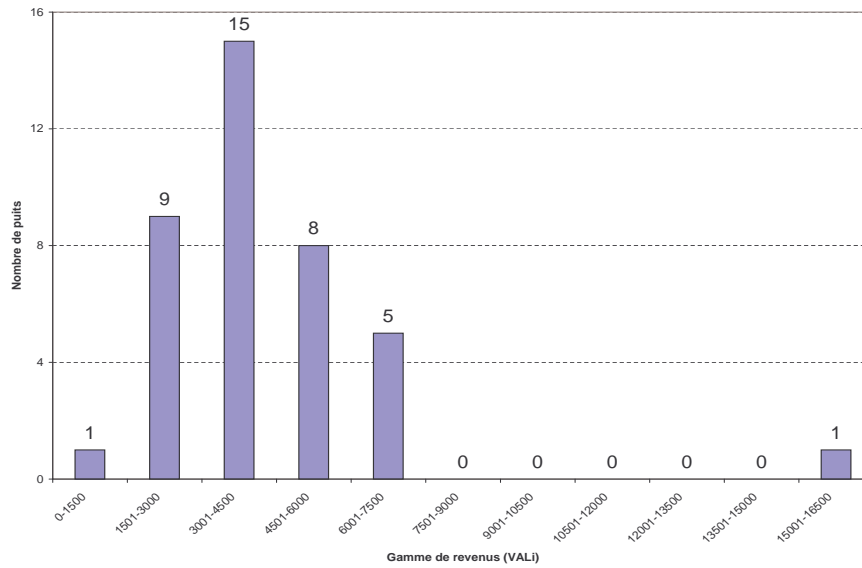


FIG. 3.6 – Histogramme des revenus générés par les puits par unité de débit (Pesos / $l \cdot s^{-1}$)

calcule un indicateur unique de valorisation du débit de chaque puits selon la formule : $VAL_i = \frac{\sum_c SUP_i MB_c}{debit}$ mesuré en Pesos / l.s-1, où MB_i est la marge brute moyenne de la culture i implantée durant la culture d'hiver et SUP_i est la superficie emblavée au sein du puits. L'analyse de la distribution cet indicateur montre une distribution normale de la valorisation des puits, avec une moyenne de 4.300 Pesos / l.s-1, et un écart-type de 2.370 (Figure 3.6).

Une valeur faible de l'indicateur indique qu'une grande partie des producteurs ont abandonné la production ou que les producteurs cultivent tous des cultures à faible marge brute. Une valeur forte de l'indicateur montre une forte diversification vers des cultures à forte valeur ajoutée.

Le seul puits à très forte valeur ajoutée observée sur la distribution correspond à une situation originale dans la région où une grande partie de la superficie a été emblavée par des cultures peu demandeuses en eau (pois-chiche) ce qui a permis de diminuer la pression sur l'eau. La diminution de la pression sur l'eau, en contrepartie a permis l'introduction de cultures horticoles. Cette solution, apparemment intéressante, est pourtant peu rencontrée dans la région. Elle nécessite une bonne coordination entre les membres du

groupe, avec un abandon des cultures traditionnelles non-risquées vers des cultures plus risquées.

3.3.3 L'historique des puits

L'historique du puits peut avoir une influence sur son mode de fonctionnement. Gillet et Ollivier (2002) ont ainsi classé les puits de la région selon leurs modes de formation, elles distinguent : *Les anciens puits officiels*. Ces puits étaient des puits initialement construits et gérés par la CNA, à l'intérieur du grand périmètre irrigué, pour pallier à certaines déficiences du grand périmètre irrigué (DR011). Ils sont situés dans les zones qui avaient de nombreux problèmes d'approvisionnement de par leur position géographique (fin de canal, terres plus hautes). En 1992, avec la réforme de la loi sur l'eau, ces puits ont été transférés aux associations d'utilisateurs de l'eau ou *modulos de riego*. La fonction principale de ces modules étant de gérer l'eau de surface, ils ont à leur tour transféré ces puits aux utilisateurs finaux, c'est à dire les membres des utilisateurs de ces puits. Cependant, l'influence des modules reste importante dans leur gestion quotidienne. Des accords de transfert ont été formellement signés entre la CNA, le DR011, le module concerné et les nouveaux représentants des puits. Dans ces accords, il est formellement stipulé que la superficie et le nombre de bénéficiaires ne peuvent être modifiés sans accord du module. De plus, la CNA se réserve le droit de superviser la gestion et de révoquer l'accord de transfert si elle estime la gestion par les membres du groupe est inadéquate. De fait, la CNA reste propriétaire des infrastructures du puits et c'est le module qui détient le titre de concession. Les modules gardent donc des liens étroits avec ces puits. Tout d'abord les *aiguadiers* du module ont en charge d'intervenir en cas de conflits entre les utilisateurs de ces puits. De plus, lors du transfert les modules ont imposé que les associations de producteurs prennent un statut légal, et soient représentés par un bureau (président, trésorier, secrétaire) qui doit être renouvelé à date fixe (tous les 3 ans). Ce bureau est d'ailleurs chargé de rendre des comptes des irrigations à l'aiguadier du module. La présence forte du module dans les activités de gestion du puits induit donc une certaine stabilité dans la gestion du puits.

Les puits individuels qui se sont ensuite élargis à une société. Ce cas de fi-

gure apparaît quand un producteur qui avait investi de manière individuelle dans un puits se retrouve contraint, souvent financièrement, à « inviter » d'autres personnes à « partager » son puits. Cela se produit quand un investissement fort s'avère nécessaire au cours de la vie du puits (électrification, re-forage plus profond). L'investissement initial est donc réalisé par un seul des membres du groupe qui se sent ainsi « plus propriétaire que les autres » du puits. La répartition du pouvoir au sein de ces groupes n'est donc pas uniforme.

Les puits émanant d'une réelle initiative collective

L'initiative collective peut être tout d'abord celle d'un ejido, représenté par son commissaire, dans le but de subvenir aux besoins de l'ejido. A leur forage, les puits d'un même ejido ne formaient souvent qu'une seule société ejidale, puis la division des terres rendant le nombre de sociétaires important, ces sociétés se sont scindées. L'emprunte de l'ejido y est encore forte, puisque les réunions et les décisions prises sont celles des ejidos (les membres ne font pas la distinction entre une réunion pour une décision générale de l'ejido et une décision afférente aux puits).

Mais il existe également des puits collectifs dont l'initiative s'est réalisée en dehors des structures de l'ejido. Ces puits se sont créés sur l'initiative de groupes ayant un intérêt commun, l'obtention de l'eau d'irrigation, et une certaine proximité géographique ou familiale.

3.3.4 Les autres activités des groupes

L'utilisation de l'eau n'est pas toujours la seule activité pratiquée en groupe par les producteurs membres. En effet, dans 50% des cas, les membres du groupe gèrent des équipements agricoles en commun : tracteurs et outils de préparation du sol.

On rencontre plusieurs cas de figure :

- groupes de puits et groupe de tracteur identique, on constate alors les mêmes types de règles s'appliquent pour la gestion de l'eau et la gestion des équipements de traction ;
- groupes de puits comprenant plusieurs groupes de tracteurs ;
- groupes de tracteurs et groupes de puits disjoints.

3.3.5 Les règles au sein des groupes

Les études sur la gestion des ressources en commun ont montré la grande diversité des règles locales pour les gérer. Ostrom (1990) fait la distinction entre deux types de règles : (a) les règles opérationnelles pour la gestion quotidienne des systèmes irrigués, (b) et les règles collectives (collective-choice rules) qui déterminent comment les règles opérationnelles sont choisies. Parmi ces règles collectives les règles constitutionnelles déterminent qui peut participer au système, et quelles modalités doivent être utilisées pour définir une série de choix collectifs, lesquels à leur tour encadrent les règles opérationnelles.

Dans cette section, nous nous intéressons essentiellement aux règles opérationnelles plutôt qu'aux règles collectives. On a retenu quatre règles essentielles : distribution de l'eau, allocation du droit d'extraction, le paiement des frais d'extraction, et la possibilité de diversifier les cultures au sein du groupe.

3.3.5.1 Distribution de l'eau

Classiquement on distingue deux règles de distribution de l'eau. La première est souvent rencontrée dans un régime de flux continu : tous les producteurs peuvent extraire de l'eau simultanément. La répartition des quantités d'eau se fait mécaniquement en introduisant des quantités différentes dans les canaux secondaires, tertiaires, etc. au moyen de répartiteurs. Ces répartiteurs assurent une fois pour toute la répartition des flux entre les différents utilisateurs et ne demande donc pas de surveillance précise. La deuxième correspond à un régime de tour d'eau où les producteurs obtiennent successivement la main d'eau selon une séquence déterminée.

Dans le système de puits collectifs, les débits des puits étant faibles, on ne peut envisager un autre système que celui du tour d'eau que l'on a d'ailleurs observé dans tous les groupes enquêtés.

Dans cette région, les dates de semis influencent les rendements potentiels des céréales. La date à laquelle chacun des producteurs disposera de l'eau d'irrigation est donc un enjeu. Dans le cycle d'hiver, si le producteur implante ses cultures trop rapidement, celles-ci seront alors susceptibles au gel en février. En revanche, les rendements décroissent rapidement au-delà

d'une date de semis du 15 janvier (cycle de croissance trop court). Pour le cycle d'été, l'obtention rapide du tour d'eau permet d'implanter des céréales à cycles longs aux rendements potentiels plus forts. Par ailleurs l'obtention tardive du tour d'eau augmente le risque d'arrivée des pluies, et donc des difficultés d'implantation des cultures (Goulet, 2002).

Un critère de choix simple, reconnu de tous, est généralement adopté pour déterminer l'ordre dans lequel chacun des membres pourra disposer de l'eau. L'imagination des producteurs n'a pas faibli pour élaborer ces critères : loterie des producteurs, loterie des parcelles, taille croissante ou décroissante des parcelles, date de récolte de la culture précédente, date de préparation du terrain, ordre physique des parcelles, etc. Au mode de détermination de l'ordre des producteurs s'ajoute souvent un « algorithme de résolution des conflits », par exemple, si deux producteurs terminent en même temps, le premier inscrit sur la liste commencera ... Ces critères varient d'une sous-région à l'autre mais influencent peu le résultat final.

Les groupes étant de taille relativement limitée, l'implémentation du tour d'eau est généralement organisée par les producteurs eux-même, sans réel besoin d'un organisateur. Le passage de la main d'eau s'effectue entre le producteur qui termine son irrigation et le suivant sur la liste d'irrigation.

Cependant, on notera deux variations dans le mode de fonctionnement du tour d'eau. Tout d'abord, on opposera les tours d'eau fixes d'une année sur l'autre aux tours d'eau renégociés chaque année. Les tours d'eau fixes (rencontrés dans 4 puits sur 36) sont symptomatiques de la présence d'un sous-groupe dominant ne désirant pas remettre en cause ses avantages au sein du groupe. En effet, cela signifie que, années après années, ce sont toujours les mêmes membres du groupe qui auront des conditions de travail défavorables. On ne remet alors pas en jeu les rentes de situation. De même, on opposera les tours d'eau « souples », dans lequel un producteur pourra changer de place au cours des irrigations successives du cycle, à ceux plus « rigides ». Dans le premier cas, un producteur peut décider de passer son tour s'il estime qu'il peut attendre un peu avant d'irriguer (15 puits sur 36). Il cherche donc un autre membre du groupe qui soit prêt à échanger son tour avec lui. Dans le deuxième cas (21 puits sur 36), les producteurs irriguent selon une séquence fixe au cours de laquelle aucune dérogation n'est permise sauf bien-sûr de passer définitivement son tour. La flexibilité peut

également se donner quand une cohabitation « pacifique » entre des cultures céréalières et des cultures horticoles existe. En effet, la plupart des cultures horticoles rencontrées dans la région ont des besoins en eau qui diffèrent sensiblement des cultures céréalières. Par exemple, l'enracinement d'un brocoli étant beaucoup moins profond que celui d'une céréale, le brocoli nécessitera des irrigations fréquentes (environ toutes les deux semaines) et de faible importance, alors que les céréales s'accommodent très bien d'un tour d'eau de trente jours avec des lames d'eau importantes. La présence de ces deux types de cultures suppose donc la coexistence de deux tours d'eau différents pour un même puits. Quand un ou deux producteurs produisent des brocolis au sein d'un puits où prédominent les céréales, cela implique que ceux-ci insèrent des irrigations faibles et fréquentes au sein d'un tour d'eau ayant une fréquence d'une trentaine de jours. Dans certains groupes, en général peu contraint par l'eau, cette flexibilité se donne, alors que dans d'autres, la production de cultures horticoles est interdite.

3.3.5.2 Allocation de l'eau

On s'intéresse à la répartition quantitative de la ressource au sein du groupe. Il existe plusieurs règles d'allocation de la ressource en eau dans les systèmes irrigués :

- Répartition égalitaire entre les différents membres du groupe, quelle que soit la superficie détenue par chacun au sein du groupe. C'est le cas, par exemple, du système *pani panchayat* dans le Maharashtra (Inde) (Yoder, 1994).
- Répartition proportionnelle à une superficie. Celle-ci peut-être la superficie détenue dans la société, comme dans le cas de la huerta de Valence en Espagne. Parfois, certains producteurs n'utilisent pas toute la surface potentiellement irrigable et la clé de répartition est alors la surface réellement cultivée.
- Répartition par un marché où les parts de chacun des membres peuvent être déterminées sur un marché (Shah, 1993).

Dans le cas des puits gérés collectivement, plus qu'une répartition des volumes, on s'intéresse au temps dont dispose chacun des producteurs quand ils possèdent la main d'eau. En effet, on peut supposer, sans trop s'écarter

de la réalité que le débit du puits est constant. Il existe donc une équivalence entre temps d'accès au puits et volume d'eau alloué. Le tour d'eau durant une trentaine de jours lors des périodes critiques, on s'intéresse à la répartition de ce temps (30 x 24 h) entre les différents membres du groupe.

Pour un faible nombre de puits de notre échantillon (4 sur 36 observés), nous avons observé une répartition égalitaire du droit d'extraction. Chaque membre du groupe dispose d'un quota d'heures d'accès au puits durant un cycle d'irrigation, indépendamment des superficies qu'il cultive. De plus, pour deux des puits où cette restriction existe, elle est accompagnée d'un micro-marché des heures d'extraction. Un producteur disposant d'un excès d'heure peut céder son excédent à un preneur d'heures à un prix convenu entre les deux parties. Cependant, ce type de répartition n'existe que quand une pénurie d'eau (abaissement important de la nappe provoquant une baisse du débit effectif du puits, vieillissement de la pompe, etc.) contraint fortement le groupe.

De même, nous avons rencontré deux groupes, où chacun des membres dispose explicitement d'un nombre d'heures déterminé par hectares emblavés. Là-encore, il s'agit plus, à notre sens, d'une répartition de la pénurie que d'une répartition d'un droit d'eau. En effet, cette règle n'apparaît que quand la pression sur le droit d'extraction devient forte. On remarquera que les producteurs qui ne sèment pas renoncent de fait à leur droit d'accès à l'eau.

Finalement, dans la grande majorité des groupes (29/36) il n'existe pas de règle explicite de répartition des temps d'extraction entre ses différents membres. La clé de répartition est la surface cultivée, même s'il n'y a pas équivalence exacte entre surface cultivée et consommation en eau. En effet, chacun des membres, quand il obtient la main d'eau, peut utiliser la technique d'irrigation qu'il préfère, dans des limites considérées comme raisonnables/acceptables par le groupe.

Cette règle évite de pénaliser ceux qui auraient de bonne raison d'irriguer plus par unité de surface (pente, nature du terrain, localisation de la parcelle, etc.), et repose donc un principe de solidarité au sein du groupe : chacun doit avoir le droit d'irriguer selon ses besoins, et le groupe ne doit pas pénaliser les producteurs qui auraient des parcelles aux conditions physiques défavorables. De fait, ce « handicap » est alors réparti sur l'ensemble du groupe.

Mais elle repose également sur l'idée que chacun des producteurs joue le jeu. Ainsi, elle génère parfois un flou sur les droits et les devoirs de chacun des membres, à l'origine de certains conflits au sein des groupes :

- « il prend autant de temps pour irriguer 8 ha que moi pour en irriguer 5ha ...il ne surveille pas bien son irrigation, et je ne vois pas pourquoi je devrais payer autant que lui »
- « sa terre est plus inclinée que la mienne, et il doit donc irriguer plus lentement, il prend donc plus de temps que moi ... »

Elle permet l'apparition de comportement de cavalier seul chez certains membres du groupe. En l'absence de règles explicites, et quand le contrôle social effectué par le groupe est trop faible, certains producteurs pourront avoir des consommations excessives.

3.3.5.3 Allocation des coûts d'extraction

Trois grandes clés de répartition des coûts d'extraction sont rencontrées :

- Une répartition égalitaire ;
- Une répartition proportionnelle à un indicateur de superficie ;
- Une répartition proportionnelle à un indicateur de consommation.

Dans un cas seulement, nous avons observé une répartition égalitaire des coûts d'extraction, alors que les superficies et les consommations de chacun des producteurs étaient très différentes. Nous avons considéré ce cas comme « pathologique » car il correspondait à une structure de pouvoir au sein du groupe très particulière (un dominant, et 10 dominés ayant un besoin d'accès à l'eau et dont la seule issue était de coopérer avec le dominant, seule source d'approvisionnement en eau possible car il détenait le titre de concession).

Dans trois autres puits, nous avons observé une répartition égalitaire des coûts d'extraction associée à la possibilité de mettre des heures d'extraction sur un marché interne au groupe. C'est la solution la plus proche de ce que pourrait être un marché des heures d'extraction d'eau dans un puits collectif.

La règle majoritairement rencontrée cependant correspond à une répartition proportionnelle à la superficie emblavée durant le cycle. Elle est compatible avec la répartition de l'eau entre les irriguants selon les superficies (cf. supra). Plus récemment, nous avons vu l'apparition de répartition des coûts proportionnelle à un indicateur de consommation. Le choix entre répartition

proportionnelle à une superficie et répartition proportionnelle à un indicateur de consommation peut être interprétée comme le résultat d'un calcul entre coût de collection de l'information et de gestion des conflits d'une part, et d'impact sur les factures individuelles.

Dans la grande majorité des cas (29 puits observés sur 36), une répartition des coûts d'extraction proportionnelle aux superficies est mise en place. Les surfaces présentent en effet l'avantage d'être connues de tous les membres du groupe. Il existe donc peu de problèmes lors de la vérification des déclarations de chacun des membres³. Dans la majorité des cas, la surface prise en compte est la surface mise en culture (27 sur 29), mais subsistent des cas où la base de paiement est la superficie possédée dans le groupe. Cette dernière règle pénalise les producteurs désireux de ne pas produire lors d'un cycle.

Cette règle se maintient quand

- Les producteurs ont des comportements coopératifs, résultant en un équilibre vertueux. Chacun dépense au sein du groupe autant que s'il était seul. Ce comportement coopératif peut être le résultat d'un contrôle social entre les différents membres du groupe efficace : « *si uno tira demasiado agua, le llamamos la atencion* », le rappel à l'ordre des gaspilleurs peut en effet être suffisamment efficace pour ne pas devoir faire appel à des règles plus contraignantes.
- Un équilibre non-coopératif est de l'intérêt de tous : « *todos tiramos igual de malo ...* », tous gaspillent l'eau, pour des raisons diverses, mais aucun ne peut vraiment blâmer l'autre ; Il en résulte des intérêts croisés bien compris : « il gaspille de l'eau parce qu'il n'est pas souvent présent lors de l'irrigation, je consomme plus d'eau car je cultive de la luzerne ... »
- Un équilibre non-coopératif est maintenu par le rapport des forces au sein du groupe : le jeu de pouvoir ne permet pas le passage à une autre règle, car il remettrait en jeu les avantages d'une majorité des membres du groupe.

Dans une situation d'équilibre durable - coopératif ou non - on aura concordance entre la règle d'allocation de la ressource (proportionnelle aux

³Certains producteurs nous ont quand même mentionné l'existence d'hectares « plus grands que d'autres ». Ce problème cependant s'estompe puisque la plupart des parcelles ont été arpentées lors de la titrisation des parcelles par le programme PROCEDE.

superficies), et la règle de répartition des coûts (également proportionnelle aux superficies). Cet équilibre se maintient durablement tant que tous les producteurs ont une consommation par unité de surface plus ou moins égale : tous consomment peu ou tous consomment beaucoup. Le deuxième équilibre, non-coopératif, a cependant des conséquences en termes de consommations d'eau bien différentes.

Dans le troisième cas, la non-concordance entre ce qu'un producteur paye et ce qu'il reçoit amène, à plus ou moins long terme, à une renégociation des règles, ou à des conflits latents. Ainsi, dans sept des vingt-neuf groupes ayant opté pour une répartition des coûts proportionnelle aux superficies, nous avons décelé des discussions internes au sein des groupes pour changer de systèmes de paiement en faveur d'une répartition plus proches des consommations réelles de chacun des membres, qui n'avaient pas abouti pour le moment. Le rapport des forces à l'intérieur n'était donc pas forcément favorable au sein de ces groupes pour amener un changement.

Dans 7 puits sur 36, la règle de répartition des coûts est basée sur un indice de consommation⁴. L'indice le plus couramment utilisé est le nombre d'heures d'accès au puits. Il présente en effet l'avantage d'être relativement facile d'observation et de contrôle entre celui qui termine et celui qui commence. Deux autres indicateurs d'utilisation potentiellement utilisables n'ont pas été rencontrés : la consommation électrique mesurée par un compteur électrique, la consommation réelle en eau mesurée par un compteur volumétrique à la sortie du puits. Dans le premier cas, les producteurs invoquent la difficulté de lecture des compteurs électriques⁵, dans le deuxième cas, les compteurs d'eau ne sont pas tous fiables et/ou opérationnels aux yeux des producteurs. L'indicateur horaire est donc un bon compromis entre coût d'observation et fiabilité des informations recueillies.

Ce type de répartition des coûts n'apparaît jamais immédiatement à la formation du groupe. La règle « naturelle » semble être une répartition des coûts proportionnelle aux surfaces car moins coûteuse en information. Après des délais variables, certains groupes décident d'un changement de règle. Ces

⁴Si l'on ajoute les sept puits ayant une clé de répartition à la consommation, et les sept puits où des discussions sont en cours, la proportion des puits potentiellement intéressés par ces règles est de 14/36, soit 35% des puits visités.

⁵Le compteur électrique compte cinq petites horloges à l'aspect sans doute rebutant pour nombre de producteurs n'ayant reçu que une ou deux années d'éducation scolaire.

changements de règles surviennent quand un facteur d'hétérogénéité apparaît ou, s'il était présent, devient plus important. Différents cas de figure se présentent :

- Certains producteurs ont des terrains aux caractéristiques différentes : pentes plus fortes, terres qui retiennent moins l'eau, etc.
- Certains producteurs décident de mettre des cultures nouvelles qui consomment une quantité différente d'eau : luzerne, cultures horticoles, etc.
- Certains producteurs ne portent pas la même attention à la gestion de l'eau que les autres : moins de contrôle de l'irrigation amenant des pertes importantes et visibles en eau, mauvais planage des parcelles, etc.

Le paiement proportionnel à la consommation n'est pas non plus sans problèmes. Dans deux cas, des groupes sont passés alternativement d'un paiement à la surface à un paiement à l'heure, pour ensuite revenir à un paiement à la surface. Dans les deux cas, des conflits étaient apparus à propos des déclarations de consommation de chacun. Ce type de problème est apparu pour les puits dont l'utilisation n'était pas continue. Un contrôle entre le producteur qui termine une irrigation et le suivant qui la commence est donc plus difficile à réaliser. Des déclarations fausses sont donc apparues rapidement, en l'absence d'un gestionnaire de puits présent au moment du démarrage et de l'arrêt de la pompe. Dans ce genre de situation, un gestionnaire de puits s'avère nécessaire pour enregistrer de manière incontestée les temps de chacun, et arbitrer les conflits. On passe donc dans un mode de gestion plus coûteux. Face à ces coûts les groupes ont donc préféré retourner à la situation initiale.

3.4 Une lecture synthétique du fonctionnement des puits

Après avoir passé en revue les différents critères individuels qui caractérisent les puits, nous proposons ici une lecture synthétique du fonctionnement interne des puits. Les études précédentes dans la région ont insisté sur l'histoire des puits pour structurer leur vision du fonctionnement actuel des puits

de la région (Gillet et Ollivier, 2002).

Tout en reconnaissant le poids de l'histoire dans l'explication du fonctionnement des groupes, nous avons cherché des critères physiques pouvant s'ajouter à cette analyse. À l'aide d'une analyse multi-variée des données recueillies sur les puits collectifs, nous avons identifié l'importance de la pression d'utilisation de l'eau par le groupe, à laquelle s'ajoute ensuite les autres facteurs. Pour ne pas encombrer inutilement le texte, les détails de l'analyse multivariée sont présentés, pour le lecteur intéressé, en annexe [A](#), page [296](#). Les types présentés ici proviennent directement de cette analyse.

Les résultats sont également présentés de manière synthétique dans les figures [3.7](#) et [3.8](#).

3.4.1 La pression théorique sur l'eau est forte

Nous avons vu précédemment que la pression théorique sur l'eau, exprimée par la variable TET varie énormément entre les groupes. Mais comme la contrainte de tour d'eau est incontournable, on constate un ajustement des cultures et/ou des superficies pour que leur tour d'eau dure au maximum une quarantaine de jours. Ces ajustements peuvent être de trois natures :

3.4.1.1 Une réduction forte et « spontanée » des cultures irriguées durant le cycle d'hiver (type 3)

Cette réduction forte peut provenir d'un abandon pur et simple du cycle d'hiver ou de l'adoption de cultures moins demandeuses en eau. En effet, dans certains puits on observe une quantité importante de cultures d'hiver ne nécessitant qu'une irrigation en début d'hiver comme le pois-chiche ou légèrement décalés comme les pastèques afin de réduire la pression sur l'eau. La caractéristique de ces puits est que la réduction n'a pas un caractère imposé par le groupe, mais résulte d'initiatives individuelles.

Ce phénomène apparaît dans les zones où les coûts d'irrigation sont élevés et la diversification vers des cultures à plus haute valeur ajoutée s'est avérée impossible.

Un coût de l'irrigation important provient soit de coûts d'extraction importants (efficacité électromécanique du puits faible, nappe profonde, etc.), soit de la nécessité dans certaines conditions d'apporter des doses importantes

d'eau pour obtenir des cultures (terrains plus légers, terrains en pente, parcelle plus éloignée du puits et desservie par des canaux en terre provoquant de nombreuses pertes de conduction).

L'impossibilité de diversifier vers des cultures à plus haute valeur ajoutée comme les cultures horticoles peut provenir de :

- Blocages à l'intérieur du groupe : la diversification vers d'autres cultures nécessiterait l'accord de tous les autres membres du groupe afin de permettre la co-existence de deux tours d'eau au sein du groupe ;
- Nécessité d'une action collective : tous les membres du groupe doivent semer des cultures horticoles ;
- *Absence d'opportunités de diversification* réelles ou perçues comme telles par les producteurs au sein du groupe (absence de marché ou de contrats, difficultés sur le marché du travail, risques importants, absence de capital physique et/ou de savoir-faire, etc.)

Dans ce cas de figure, seul un nombre réduit de producteurs décident d'irriguer en hiver ce qui diminue fortement la pression sur l'eau, les autres parcelles étant laissées nues durant le cycle d'hiver. Un certain nombre de producteurs ont donc opté pour une agriculture à un cycle d'été long (avec une seule irrigation d'appoint au printemps), alors que le reste du groupe continue de travailler sur un rythme de deux cycles par an.

Au sein de ces groupes, la répartition des coûts d'extraction se fait en proportion aux superficies cultivées. La répartition des coûts fixe est réalisée en proportion avec les superficies au sein du puits, qu'elles soient cultivées ou non.

3.4.1.2 Le groupe adopte des règles qui contraignent la consommation de chacun des membres du groupe (type 4).

Ces règles varient selon les groupes, mais vont tous dans le sens d'une limitation du temps imparti afin de permettre un tour d'eau convenable. On rencontre essentiellement trois règles :

- *Une limite sur le temps d'irrigation, pour chacun des membres*, indépendante des superficies emblavées et associée à un paiement égalitaire entre les différents membres du groupe. Dans certains groupe, un marché des heures d'extraction est instauré, alors que dans d'autres une

heure non-consommée est perdue. Comme les producteurs choisissent librement les superficies et les cultures, certains producteurs implantent des cultures fourragères.

- *Une limite sur la superficie irrigable, pour chacun des membres.* La réduction peut être proportionnelle aux superficies possédées ou indépendante des superficies initiales de chacun des membres. Dans ce dernier cas, on rencontre une répartition égalitaire des frais d'extraction, alors qu'un paiement au prorata des surfaces emblavées régit les groupes précédents. Les temps d'irrigation pour chacun des membres sont donc « libres ».
- *Une limite sur le temps d'irrigation par unité de surface* : par exemple : 15 heures d'accès au puits par hectare semé.

Nous verrons ultérieurement que ces trois types de règles ont des conséquences sensiblement différentes sur l'efficiencia d'utilisation de l'eau par les producteurs.

3.4.2 La pression théorique sur l'eau est normale ou faible

3.4.2.1 Avec absence de flexibilité au sein du tour d'eau (type 2)

La rigidité du tour d'eau se manifeste par l'impossibilité pour un producteur de changer l'intervalle entre deux irrigations, qui est commandé par l'ensemble du groupe. De fait, cela ne permet pas aux producteurs qui auraient implanté des cultures demandant des irrigations à intervalles rapprochés comme certaines cultures horticoles (brocolis, fraises, etc.) de s'intercaler au sein du tour d'eau. Dans ces conditions les membres du groupe n'ont donc aucunes autres alternatives productives que les cultures céréalières.

Pour ces mêmes cultures céréalières, on contraint également chacun des membres du groupe à un rythme d'irrigation qui ne lui est pas forcément favorable. Quand un producteur obtient la main d'eau, il ne peut vraiment la décliner !

L'homogénéité des consommations est alors imposée de manière interne au sein du groupe. Le paiement à l'hectare est souvent rencontré.

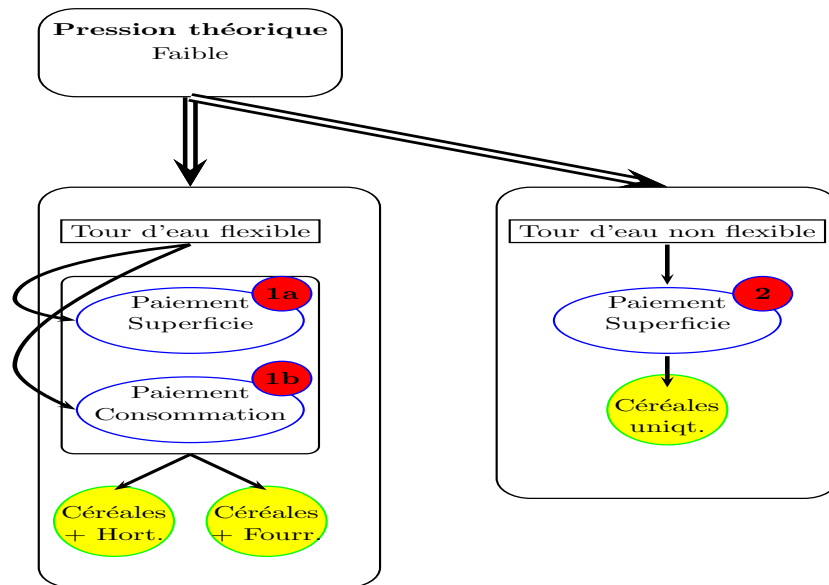


FIG. 3.7 – Une typologie du fonctionnement des groupes de puits (pression faible)

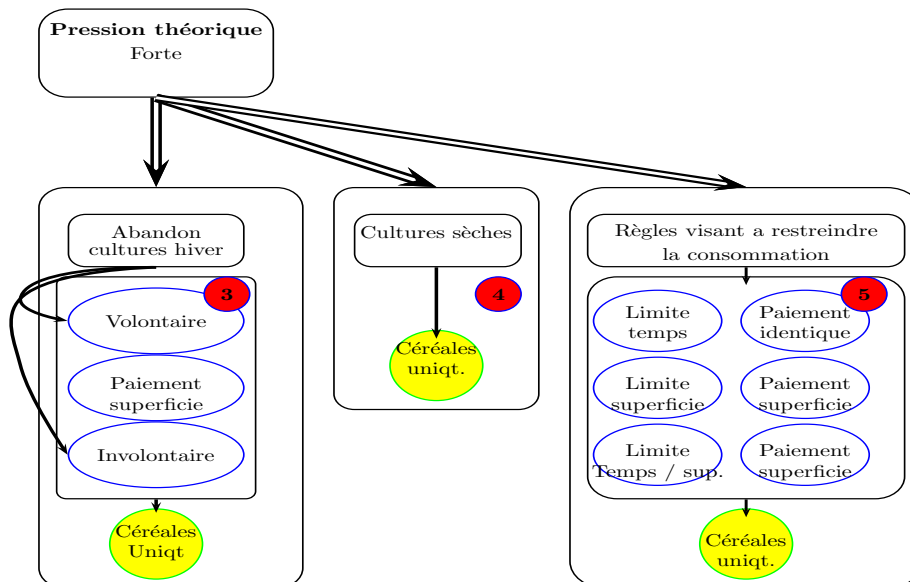


FIG. 3.8 – Une typologie du fonctionnement des groupes de puits (pression forte)

3.4.2.2 Avec une certaine flexibilité au sein du tour d'eau

A l'opposé, dans certains groupes, une certaine flexibilité est donnée au tour d'eau. Concrètement, on pourra voir s'intercaler un tour d'eau de un mois avec un tour d'eau de 15 jours au sein du même puits.

Deux cas de figure :

- « On donne la chance » à un ou deux producteurs isolés qui cultivent quelques hectares de cultures alternatives au sein d'un groupe où sont présentes essentiellement des céréales.
- Tous les producteurs ont un pourcentage de cultures alternatives.

La présence de cultures non céréalières introduit au sein des groupes une grande hétérogénéité des consommations en eau. Au niveau des groupes apparaissent ainsi des discussions sur le mode de répartition des coûts d'extraction de l'eau.

On distingue alors deux groupes :

- Les groupes où la règle de paiement a évolué (type 1b) vers une répartition proportionnelle à un indicateur de consommation réelle. Après discussion, les producteurs décident de mettre en place un suivi des consommations réelles.
- Sans évolution des règles de paiement (type 1a). Cela peut provenir d'un blocage dans les négociations . . . ou qu'il y a consensus en estimant que les consommations des uns et des autres s'équilibrent après tout !

Cette typologie permet donc de distinguer 5 modes de fonctionnement des groupes de puits, qui résume l'ensemble des situations rencontrées dans la région.

3.5 Statistiques des producteurs au sein des puits collectifs

Cette section est basée sur une analyse descriptive des données d'enquêtes réalisées auprès des 80 ménages agricoles membres des puits collectifs. Certaines enquêtes ayant été jugées non traitables, nous avons un effectif final de 67 enquêtes valides. Les données moyennes des données quantitatives relevées auprès des producteurs visités sont présentées dans le tableau 3.1.

Var	Description	Moyenne	Ecart type	Min	Max
<i>SP</i>	Superf. en propriété	6,92	5,63	0,71	30
<i>SD</i>	Superf. développée	16,37	16,13	0,85	92
<i>SPD</i>	Superf. en propriété développée	13,24	10,90	0,85	58
<i>SOI</i>	Superf. cycle hiver	7,28	8,70	0	50
<i>SBA</i>	Superf. barrage	1,87	5,93	0	34
<i>SPC</i>	Superf. puits collectif	10,30	12,25	0,85	72
<i>SPLU</i>	Superf. pluvial	0,75	2,09	0	14
<i>Pgg</i>	Pourc. gros grains	46,00	19,62	0	87,5
<i>Pgf</i>	Pourc. grains fins	28,03	19,68	0	83,3
<i>Phor</i>	Pourc. cult. horticoles	7,59	19,60	0	100
<i>Pfor</i>	Pourc. cult. fourragères	12,23	23,18	0	100
<i>UGB</i>	Unité gros bovins	3,72	5,88	0	33
<i>Cerdo</i>	No. de porcs	2,64	8,00	0	50
<i>AdultCasa</i>	No. adultes	4,70	3,09	1	18
<i>AdultOtrab</i>	No. adultes travaillant à l'extérieur	1,29	2,43	0	18

TAB. 3.1 – Les statistiques de base sur les membres des puits collectifs

La grande majorité des producteurs membres des puits collectifs sont également des *ejidatarios*. Les superficies en propriété (*SP*) sont donc relativement faibles et leur moyenne est d'environ 7 hectares. On constate cependant une grande variabilité dans les superficies en propriété qui résultent de 2 phénomènes : (1) le morcellement de la terre au sein des ejidos au passage des générations, (2) un processus plus récent de reconsolidation des terres, certains producteurs ayant une stratégie d'acquisition de terre.

Les superficies en propriété n'excèdent pas 30 hectares. En effet, les producteurs qui possèdent plus de superficie ont généralement un puits qu'ils gèrent seuls (voir pour cela la typologie plus générale et développée par ailleurs des producteurs de l'Etat de Guanajuato (Jourdain *et al.*, 2001a; Jourdain *et al.*, 2001b)).

Les superficies développées (*SD*) sont calculées en ajoutant les superficies cultivées par un producteur dans une seule année (deux ou trois cycles selon les cas). Cela comprend donc les superficies en propriété et les superficies prises en location. La superficie moyenne développée est de 16 hectares. Etant en zone de puits, on constate que la plupart des producteurs font en moyenne deux cycles par an sur les superficies en propriété (*SPD*).

Par ailleurs, on constate que les producteurs qui ont accès à de l'eau de puits collectifs ont très peu accès aux autres sources d'eau. Aucun des producteurs rencontrés ne possède de puits individuel, et les surfaces étant alimentées par seulement par de l'eau de barrage sont souvent faibles.

Les cultures prédominantes sont les gros grains (maïs et sorgho), les grains fins (blé, orge). On trouve là-encore une grande diversité des situations, entre les producteurs produisant essentiellement des grains, et des producteurs ayant diversifié vers des productions horticoles (jusqu'à 100% des superficies!), ou vers des cultures fourragères (là également jusqu'à 100% des superficies).

Le nombre d'animaux est faible, que ce soit en élevages bovins ou porcins. De nombreux exploitants possèdent quelques vaches pour l'autoconsommation de lait. Mais on trouve également des producteurs ayant choisi de mettre en valeur les productions végétales au travers d'un atelier d'élevage. Nous n'avons pas rencontré de gros élevages (le nombre maximum d'UGB dans une même exploitation étant de 33 UGB). La même remarque vaut pour les productions porcines.

Les données sur la composition des ménages (fin du tableau 3.1), et les sources principales de revenus (tableau 3.2) donnent des informations intéressantes sur les stratégies adoptées par les différents ménages agricoles au sein des puits collectifs.

Les ménages sont de taille relativement importante avec en moyenne 4 adultes par ménages. Certains adultes peuvent être employés à l'extérieur. La répartition des emplois au sein du ménage sera une source importante de diversification entre les ménages.

Variable	Description	Important		
		Pas	Oui	Très
<i>ImpAgric</i>	Importance de l'agriculture	2	16	49
<i>ImpGanaderia</i>	Importance de l'élevage	36	20	11
<i>ImpMigracion</i>	Importance de la migration	44	8	15
<i>ImpNoagric</i>	Importance des rev. non-agricoles	33	13	21

TAB. 3.2 – Sources de revenus au sein des ménages : répartition des effectifs généraux

N'étant pas situé dans une zone marginale, les revenus de l'agriculture

représentent, pour la plupart des ménages, une part significative de leurs revenus globaux. Cependant, on constate que les revenus extra-agricoles, qu'ils soient en provenance de la migration ou du travail extérieur à l'exploitation de certains membres de la famille, constituent également une source importante de revenus pour une grande partie des ménages rencontrés ($15+21 = 36$ ménages / 67). Un bon nombre de ménages ne seront donc pas des ménages exclusivement agricoles. D'une manière plus marginale, les productions animales constituent une source importante de revenus pour la moitié de la population.

3.6 Les différents types de producteurs

Après avoir passé en revue les différents critères individuels qui caractérisent les unités de production et les ménages, nous proposons ici une lecture synthétique des ces mêmes ménages. Cette lecture s'appuie sur une analyse multivariée (analyse des correspondances multiples + classification automatique des données de sorties de l'analyse des correspondances multiples) présentée en annexe [B](#) page 306.

Cette analyse nous montre quatre groupes distincts de ménages : les petits producteurs pluriactifs, les producteurs moyens ayant un atelier d'élevage, les producteurs moyens de céréales, et les plus gros producteurs preneurs de terre. Nous décrivons successivement ces systèmes.

3.6.1 Les petits producteurs pluriactifs

Les producteurs de ce groupe ($n = 14$) possèdent en moyenne 3 hectares en propriété, qu'ils irriguent complètement avec de l'eau du puits collectif. Ces superficies sont, en général, cultivées deux cycles dans l'année donnant une superficie développée de 6 hectares en moyenne. On constate cependant que certains producteurs sèment moins en hiver ($SOI\ m = 2$ ha). Bien que les superficies en propriété soient faibles, ces producteurs ont peu recours à la location pour augmenter les superficies cultivées (superficie louée moyenne = 0,6 ha).

Ces unités de production, sans doute de part leur petite taille, ne sont en général pas mécanisées ($TRACT = 0$). Cela ne veut pas dire que les cultures

pratiquées ne sont pas mécanisées, mais que les producteurs doivent avoir recours à la location d'équipement pour mener à bien les activités agricoles.

De même, dans leur grande majorité ces producteurs ne diversifient pas vers des cultures horticoles ou fourragères. Quand on trouve de l'élevage, il s'agit de quelques animaux dont les productions (lait, viande) sont auto-consommées.

Le nombre d'adultes membres du ménage est en général élevé ($m = 6$ adultes), qui pour une grande part possède des revenus extra-agricoles. Les revenus de la migration ne sont pas cités comme importants dans ce cas.

Ces ménages ont donc un faible capital foncier et de migration, mais une main d'œuvre familiale importante. Ils valorisent celle-ci surtout par le biais du travail extérieur à l'exploitation. On constate par ailleurs que ces producteurs fournissent très peu de travail propre dans les productions céréalières puisqu'ils ont essentiellement recours au travail à façon pour les différents travaux (préparation du sol, semis, engrais, désherbage et récolte).

3.6.2 Les producteurs moyens avec des productions fourragères

Les unités de production de cette classe ($n = 12$) n'ont pas des superficies (en propriété, louées et cultivées) significativement différentes de la classe précédente. En revanche, elles se distinguent par la présence plus importante de cultures fourragères dans la sole, et la présence un peu plus importante de productions animales.

Ces cultures fourragères peuvent être valorisées par la vente directe de fourrage pour lequel existe un marché important dans la région ou au travers d'un élevage. La possibilité de vendre des fourrages explique la relation floue qui existe entre présence de fourrages et présence d'animaux dans le système de production. La culture fourragère essentiellement rencontrée est la luzerne. La luzerne présente l'avantage d'un revenu régulier (10 coupes par an) soit par une vente quasi-mensuelle de fourrage, soit par la vente de lait régulière.

Le nombre d'adultes dans le ménage y est également important, mais on constate une faible occupation des producteurs à l'extérieur. Pour ces ménages, la main d'œuvre est valorisée au sein de l'exploitation agricole par un atelier élevage plus ou moins important. Les revenus de la migration repré-

sentent également pour ces ménages une part importante des revenus. Ces ménages n'ont généralement pas non plus d'accès direct à la mécanisation, sauf quand ils font partie d'un groupe de mécanisation. Cependant, ces cas sont isolés dans cette classe de producteurs.

3.6.3 Les producteurs moyens céréaliers

Ce groupe (groupe 2, $n = 27$) est constitué d'unités de production gérant des superficies légèrement plus importantes que les deux précédentes même si la différence n'est pas significative statistiquement. Les superficies cultivées en hiver sont cependant plus importantes que pour le groupe des petits producteurs. Les cultures d'hiver sont essentiellement des grains fins - blé et orge.

La taille des ménages est, en général, plus réduite, et essentiellement occupée à l'agriculture. Ces ménages occupent donc la main d'IJuvre familiale à la production céréalière (deux cycles par an), parfois complétée par des revenus de la migration.

Ces producteurs ont souvent accès directement à la mécanisation par le biais de groupes de mécanisation. Il semble donc que la main d'œuvre familiale est plus impliquée dans les travaux de production des céréales (contrairement aux deux groupes précédents, où ils ne sont que les maîtres d'IJuvres des activités de production).

3.6.4 Les producteurs « en croissance »

Cette dernière catégorie (groupe 3, $n = 14$) de producteurs gère des superficies plus importantes. Premièrement, en faire-valoir direct, car c'est dans ce groupe que l'on trouve les plus grosses surfaces en propriété, mais également en faire-valoir indirect, par le biais de la prise de location ou de contrats divers de métayages (« *al partido* »).

Il s'agit, pour la plupart, d'ejidatarios qui cherchent à augmenter leurs surfaces par le biais d'achats ou par le biais de la location.

La taille des exploitations leur permet d'avoir un tracteur en propriété individuelle.

On constate pour certaines de ces exploitations également des revenus de la migration et des revenus non-agricoles.

On peut faire l'hypothèse que ces producteurs utilisent les revenus de la migration pour augmenter leurs superficies (achat de terres) ou leurs équipements. Cela leur permet ainsi d'atteindre une taille critique, et d'avoir des coûts fixes moins importants. Les productions constatées dans ces unités sont uniquement céréalières.

3.7 Conclusions

Ce chapitre avait pour but principal de décrire les différents types de puits rencontrés, leur mode de fonctionnement et les différents types de producteurs de la région.

Pour les puits, le critère de pression sur l'eau, nous a permis de distinguer quatre grandes catégories de systèmes irrigués. La pression sur l'eau engendre un certain nombre de « réactions » qu'il est intéressant d'observer. En effet, elle donne un avant-goût de ce que pourrait être la réaction des producteurs à une limitation des temps de pompage. Certains groupes arrivent à initier des règles qui permettent de gérer cette pénurie. Les règles internes sont assez classiques : une révision des modes de tarification d'une part, ou l'instauration de quotas, d'autre part. D'autres groupes ne peuvent vraiment instaurer de nouvelles règles de gestion, ce qui conduit à un abandon progressif des cultures d'hiver (blé/orge). Cependant, l'observation des données recueillies ne nous permet pas de dire si l'absence d'apparition de nouvelles qui conduit à la disparition des cultures d'hiver, ou si ce sont les autres caractéristiques des puits (profondeur de la nappe notamment) qui engendre la disparition des cultures d'hiver plus prématurément que dans les autres puits. Une modélisation des différents types de puits devrait nous permettre d'avancer dans ce domaine.

Par ailleurs, nous avons caractérisé la diversité des systèmes de production et distingué quatre grandes classes d'unité de production. On soulignera ici quelques points. Premièrement, les grandes classes de producteurs se retrouvent disséminés dans les différents groupes de puits, sans que l'on retrouve une correspondance claire entre type de producteurs et types de puits. Deuxièmement, on a constaté que les cultures horticoles, pourtant présentes dans les zones échantillonnées, sont pratiquement absentes. La gestion de deux tours d'eau, pour les cultures céréalières et les cultures horticoles, ap-

paraît comme difficile au sein des puits collectifs. En revanche, on a constaté une présence beaucoup plus importante de cultures fourragères dans les puits enquêtés.

Les observations de terrains, que nous avons essayé de synthétiser dans ce chapitre, nous serviront de matériel de base pour la construction des modèles de d'exploitation et de puits collectifs représentatifs de la réalité des producteurs.

Chapitre 4

Interactions stratégiques entre les producteurs : une première représentation stylisée

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, et ceux qui vont suivre, on analysera l'impact des politiques sur les consommations en eau des puits collectifs. Pour l'analyse des comportements des *systèmes puits collectifs*, on devra faire des hypothèses sur leur structure et leurs institutions (règles) ainsi que sur le comportement des *systèmes de production* qui les composent. En ce qui concerne les producteurs, on peut leur prêter deux comportements opposés. Le premier est un comportement *coopératif*. Dans ce cas, chaque producteur travaille pour la construction d'une utilité commune au groupe. Des mécanismes de transferts internes, non étudiés ici, peuvent se mettre en place pour compenser les différences d'efficacité au sein du groupe. Ce mécanisme de fonctionnement est une situation idéale-type peu susceptible de se rencontrer dans la réalité, mais qui constitue une situation de référence à laquelle on pourra comparer les autres situations. A l'inverse, le deuxième comportement est un comportement *non-coopératif*. Dans ce cas de figure, chaque producteur travaille de manière individuelle et individualiste pour la création de sa propre utilité. En l'absence d'utilité unique, chaque producteur essaie d'optimiser son utilité, sachant que les autres feront de même. Le « chacun pour soi » n'est pas forcé-

ment synonyme de chaos. Nous avons vu que les producteurs mettent en place un certain nombre de règles de distribution de la ressource et d'allocation des coûts d'extraction. Ces règles visent en fait à *borner* les comportements des producteurs, mais leur laissent une certaine marge de manœuvre : dans le cadre réglementaire du puits collectif, chaque producteur reste maître de ses choix productifs. Nous comparerons donc, sous l'hypothèse de comportement non-coopératifs, l'impact des règles collectives

On ne place pas le comportement non-coopératif comme un dogme puisque l'on voit apparaître, de manière endogène, un certain nombre de règles. On cherche, par contre, à quantifier l'impact des règles de décision (explicites ou implicites) que les producteurs ont réussi à établir au sein des groupes par rapport à un puits sans règles ou il y aurait un comportement non-coopératif. Finalement, on cherche à évaluer l'impact des interactions entre les instruments économiques et normatifs (prix, quotas d'électricité) et les règles collectives.

En résumé, nous aurons donc deux modèles-types : le modèle coopératif pur (« *tous pour un* »), et le modèle non-coopératif (« *chacun pour soi* »). Ce dernier sera décliné en fonction des règles internes mises en place par les groupes.

Rappel sur l'équilibre non-coopératif Dans sa présentation la plus générale, un jeu non-coopératif comprend n joueurs. A chaque joueur i est associé un ensemble $X_i \subseteq R^n$ de stratégies et une fonction d'utilité $u_i : X \rightarrow R$, où $X = \prod_i X_i$. L'utilité d'un joueur dépend en effet, de la stratégie qu'il adoptera lui-même, mais aussi des stratégies x_{-i} choisies par l'ensemble des $n - 1$ autres joueurs ¹.

Dans le cadre d'un équilibre de Nash, chaque joueur maximise son utilité en assumant que les stratégies des autres joueurs sont établies et connues. Pour un ensemble donné de stratégies Z_{-i} des autres joueurs, le joueur i doit résoudre un problème d'optimisation :

$$\max_{x_i \in X_i} U(z_i, Z_{-i})$$

¹la notation $x_{-i} = (x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$ sera employée ici pour noter l'ensemble des stratégies employées par les $n - 1$ autres joueurs.

Le vecteur $z = (z_1, \dots, z_n)$ est un équilibre de Nash du jeu, si pour chaque joueur $i = 1, \dots, n$ on a

$$\forall z_i \in X_i \quad U(z_i, Z_{-i}) \leq u_i(z)$$

Il existe diverses formes de l'équilibre de Nash en fonction des hypothèses que l'on émet sur l'information disponible pour chacun des joueurs et sur les modalités pratiques du jeu. On prend l'hypothèse que les joueurs connaissent l'ensemble des stratégies et des gains potentiels de chacun des joueurs, mais également qu'ils ont connaissance du niveau de connaissance des autres². Dans ce qui va suivre, nous faisons également l'hypothèse de jeux non-répétés.

4.2 Les interactions stratégiques induites par les règles de répartition des coûts d'extraction et les fonctions tarifaires

4.2.1 Un premier exemple simple

On prend l'exemple d'un puits géré en commun par deux producteurs. Ceux-ci possèdent respectivement n_1 et n_2 hectares de terres irriguées par ce puits. Les deux producteurs valorisent l'eau pompée selon une même fonction de production $f(e)$, où e est l'eau *effective*, c'est-à-dire effectivement utilisée par les plantes. La fonction f est supposée croissante et concave.

L'efficacité technique des producteurs est mesurée par le ratio entre l'eau totale consommée et l'eau effectivement consommée par les plantes. Dans ce premier exemple, celle-ci est supposée constante et exogène. Nous avons donc la relation $e = h \cdot a$, où h est l'efficacité du producteur et a l'eau totale consommée. Les producteurs peuvent différer en termes d'efficacités techniques.

On considère, dans un premier temps, qu'il n'existe pas de contraintes sur la disponibilité en eau. Si on fait l'hypothèse que la consommation électrique du puits est une fonction linéaire de la profondeur de la nappe, celle-

²Le joueur connaît les stratégies et les gains potentiels des autres, et sait que les autres connaissent sa fonction, et que les autres savent qu'il sait, etc.

ci pourra s'écrire comme un produit $\mu \cdot \gamma$ où μ correspond à la quantité nécessaire d'électricité pour élever une quantité d'eau de 1 m^3 d'une hauteur de 1m , exprimée en $\text{kW}/\text{m}/\text{m}^3$, et γ est la profondeur dynamique de la nappe (exprimée en m). Le coût d'extraction d'une quantité q d'eau devient alors : $c(q) = \mu \cdot \gamma \cdot q \cdot u(\mu \cdot \gamma \cdot q)$ où u est la fonction tarifaire de l'électricité agricole (exprimée en Pesos/kW). Comme nous l'avons vu, cette dernière pourra dépendre des quantités d'électricité consommées, mais sera considérée tout d'abord comme constante $u = \text{constante} = \theta_e$.

4.2.1.1 Mise en commun des profits et équilibre efficient

La situation de référence sera la situation d'efficience où les producteurs coopèrent afin de maximiser le revenu obtenu à partir de l'eau d'irrigation extraite du puits collectif³, sans se soucier de la répartition ultérieure des bénéfices de l'opération.

Dans ce cas, on effectue la somme des fonctions de profit des deux producteurs, ce qui s'écrira :

$$\pi^1(a_1, a_2) = n_1 \cdot \theta_b \cdot f(h_1 \cdot a_1) + n_2 \cdot \theta_b \cdot f(h_2 \cdot a_2) - c(n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2) \quad (4.1)$$

où θ_b représente le prix du produit agricole. Du fait de la coopération entre les agents, la répartition des coûts de d'extraction entre les deux membres du groupes n'influence pas le résultat final, on ne s'en préoccupe donc pas ici.

Les conditions de premier ordre, pour des efficacies et des surfaces données, seront :

$$\frac{\partial \pi^1}{\partial a_1} = n_1 \cdot \theta_b \cdot h_1 \cdot f'(h_1 \cdot a_1) - n_1 \cdot c'(n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2) = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \pi^1}{\partial a_2} = n_2 \cdot \theta_b \cdot h_2 \cdot f'(h_2 \cdot a_2) - n_2 \cdot c'(n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2) = 0 \quad (4.3)$$

Pour notre premier modèle, nous prenons une fonction de tarification uniforme. Dans ce cas, la fonction de coût d'extraction est une fonction linéaire des consommations en eau : $c(q) = \mu \cdot \gamma \cdot \theta_e \cdot q$.

³On suppose pour l'instant que les producteurs ne sont pas averses aux risques et maximisent donc l'espérance de leur profit.

Les conditions de premier ordre deviennent donc :

$$\theta_b \cdot h_1 \cdot f'(h_1 \cdot a_1) = \mu \cdot \gamma \cdot \theta_e \quad (4.4)$$

$$\theta_b \cdot h_2 \cdot f'(h_2 \cdot a_2) = \mu \cdot \gamma \cdot \theta_e \quad (4.5)$$

f étant supposée continue, monotone croissante et concave, les fonctions f' et f'^{-1} sont décroissantes. On pourra donc obtenir une solution générale :

$$a_1 = \frac{f'^{-1}\left(\frac{\mu \cdot \gamma \cdot \theta_e}{h_1 \cdot \theta_b}\right)}{h_1} \quad (4.6)$$

$$a_2 = \frac{f'^{-1}\left(\frac{\mu \cdot \gamma \cdot \theta_e}{h_2 \cdot \theta_b}\right)}{h_2} \quad (4.7)$$

Les solutions retenues en terme de consommation d'eau par les deux producteurs sont indépendantes des surfaces brutes et relatives des deux producteurs. Elles dépendent uniquement des efficacités techniques respectives des deux producteurs. Elles correspondent également aux solutions que prendrait chacun des producteurs s'il était seul à gérer le puits.

4.2.1.2 Paiement au prorata des surfaces emblavées et comportement non-coopératif

On n'a pas rencontré dans les groupes de puits étudiés, le mode de fonctionnement qui consisterait à optimiser les performances du groupe. Plutôt, les groupes instituent des règles de répartition des coûts d'extraction qui permettent de faire fonctionner le puits et permettent également à chacun de prendre des décisions de manière individuelle. Nous traiterons tout d'abord le cas d'une répartition des coûts au prorata des superficies emblavées.

Les fonctions de profit de chacun des producteurs deviennent :

$$\pi_1^2(a_1, a_2) = n_1 \cdot \left(\theta_b \cdot f(h_1 \cdot a_1) - \frac{c(n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2)}{n_1 + n_2} \right) \quad (4.8)$$

$$\pi_2^2(a_2, a_1) = n_2 \cdot \left(\theta_b \cdot f(h_2 \cdot a_2) - \frac{c(n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2)}{n_1 + n_2} \right) \quad (4.9)$$

Dans ce cas de figure, l'équilibre d'efficience a des grandes chances de ne pas être respecté puisque chacun des producteurs, à ce niveau de consom-

mation, aura intérêt à consommer une quantité plus importante d'eau. En effet, le coût de la consommation supplémentaire sera réparti entre les deux producteurs alors que les bénéfices seront individuels.

Les formes des courbes de coût et de profit assurent cependant l'existence d'un équilibre unique. Les conditions de premier ordre pour la recherche de ce point d'équilibre nous ramènent à la résolution d'un système de deux équations à deux variables a_1 et a_2 .

Dans le cas d'une tarification uniforme, après résolution du système d'équations des conditions de premier ordre, on obtient les fonctions de demande en eau de chacun des producteurs :

$$a_1 = \frac{f'^{-1}\left(\frac{n_1 \cdot \mu \cdot \gamma \cdot \theta_e}{h_1 \cdot \theta_b \cdot (n_1 + n_2)}\right)}{h_1} \quad (4.10)$$

$$a_2 = \frac{f'^{-1}\left(\frac{n_2 \cdot \mu \cdot \gamma \cdot \theta_e}{h_2 \cdot \theta_b \cdot (n_1 + n_2)}\right)}{h_2} \quad (4.11)$$

A partir du système d'équations 4.10 et 4.11, on fera cinq remarques. Premièrement, les superficies *relatives* des deux producteurs influent sur les consommations des producteurs. La fonction de production f étant supposée continue et croissante avec des rendements marginaux décroissants, la fonction f' existe et son inverse existe et est également décroissante. Plus un producteur détient une part importante des superficies irriguées (plus le coefficient $\rho_i = \frac{n_i}{n_1 + n_2}$ devient important), moins sa consommation à l'hectare a_i sera importante. La logique de ce résultat est que plus la proportion est importante moins le producteur peut faire supporter les coûts supplémentaires d'extraction sur l'autre producteur.

Deuxièmement, on pourrait étendre simplement les résultats obtenus au cas de n producteurs. Dans le cas d'une répartition homogène des superficies entre les producteurs, plus le nombre de producteurs est important, plus le coefficient ρ_i devient faible, plus les incitations à la surconsommation sont importantes.

Troisièmement, le producteur ne prend en compte que sa propre efficience technique et non pas celle de son partenaire dans sa décision de consommation en eau. Autrement dit, une amélioration de l'efficience technique d'un des deux producteurs, n'incite pas l'autre producteur à changer sa consommation d'eau.

Quatrièmement, le coefficient de pondération ρ_i est compris entre 0 et 1, les consommations en eau des deux producteurs sont toujours supérieures à celles obtenues dans le cadre d'un équilibre d'efficience, même quand les producteurs sont identiques par leurs surfaces et par leurs techniques. Le fait d'avoir des producteurs identiques par la superficie et par les techniques utilisées n'enlève pas le besoin de coopération entre les producteurs ou l'instauration de règles incitant les producteurs à coopérer afin d'éviter un problème de type dilemme du prisonnier.

Finalement, le coefficient ρ_i étant toujours inférieur à 1, les producteurs, dans le cadre d'un équilibre non-coopératif, seront toujours moins réactifs aux prix de l'électricité que dans le cadre d'un équilibre efficient. L'élasticité prix de la consommation en eau sera toujours inférieure dans le cadre d'un équilibre non-coopératif à celle d'un équilibre efficient. De plus, la réactivité des producteurs aux variations de prix sera d'autant plus faible que les producteurs auront une superficie faible au sein du groupe.

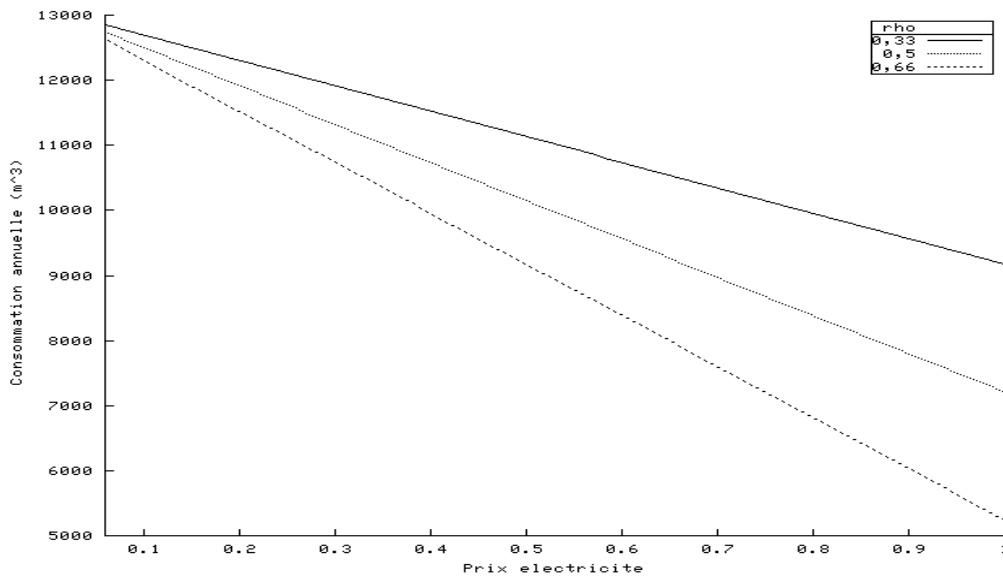


FIG. 4.1 – Consommation en eau d'un producteur en fonction du prix de l'électricité et du facteur ρ

La figure 4.1 illustre ces différents points, dans le cas d'un puits avec deux producteurs ayant des fonctions de productions quadratiques. Dans ce cas, les fonctions de demande en eau sont linéaires. On constate peu de différences dans les consommations quand le prix de l'électricité est faible,

mais les différences de consommation s'accroissent quand les prix augmentent. Dans cet exemple simple, les producteurs reçoivent donc le signal prix de manière différenciée en fonction de la part de la superficie qu'ils possèdent au sein du puits.

4.2.1.3 Paiement au prorata des consommations et comportements non-coopératifs

Le deuxième mécanisme de répartition correspond à une répartition de la consommation globale d'électricité du puits au prorata des consommations en eau ou en électricité. Pour des raisons de simplicité de mesure, les groupes observent plutôt les temps d'irrigation comme variable indicatrice des consommations en eau, mais le résultat est identique si l'on suppose que le débit et l'efficacité électromécanique du puits sont constants et que le niveau dynamique de la nappe est également constant.

Les fonctions de profit des deux producteurs s'écriront donc :

$$\pi_1^3(a_1, a_2) = n_1 \cdot (\theta_b \cdot f(h_1 \cdot a_1)) - \frac{a_1 \cdot c(n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2)}{n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2} \quad (4.12)$$

$$\pi_2^3(a_2, a_1) = n_2 \cdot (\theta_b \cdot f(h_2 \cdot a_2)) - \frac{a_2 \cdot c(n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2)}{n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2} \quad (4.13)$$

Dans ce cas de figure et pour une tarification électrique uniforme, le même raisonnement de calcul de l'équilibre de Nash conduit à des résultats identiques à ceux obtenus pour un équilibre d'efficacité (équations 4.6 et 4.7).

Le passage d'une clé de répartition des coûts d'extraction fonction des superficies à celle fonction des consommations réelles permet donc, dans le cadre d'une tarification uniforme, d'éliminer les interactions stratégiques entre producteurs menant à des surconsommations.

4.2.1.4 Tarification binôme et implication pour les interactions stratégiques entre producteurs

Les résultats obtenus précédemment étaient tous basés sur l'hypothèse d'une tarification uniforme de l'électricité. Nous avons vu que divers types de tarifications peuvent être envisagés (Chapitre 2). Nous ne passerons pas en revue ici les différents types de tarification et leurs impacts sur les consom-

tions. Cependant, nous traiterons le cas de la tarification binôme car il peut également être traité de manière analytique, et qu'il apporte des éléments nouveaux par rapport aux conclusions précédentes.

La tarification binôme implique que la fonction de coût d'extraction devient : $c(q) = \mu \cdot \gamma \cdot q \cdot (\theta_1 + \theta_2 \cdot \mu \cdot \gamma \cdot q)$. On reprend maintenant les 3 cas de figure travaillés précédemment : équilibre coopératif, équilibre non-coopératif et répartition au pro-rata des superficies, équilibre non-coopératif et répartition au pro-rata des consommations réelles.

Dans le cadre d'un équilibre efficient on obtient le système des conditions de premier ordre pour l'obtention d'un équilibre :

$$\begin{aligned}
 (a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2) \cdot \gamma^2 \cdot \mu^2 \cdot \theta_2 &+ \\
 \gamma \cdot \mu \cdot (\theta_1 \cdot (a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2) \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \theta_2) &= h_1 \cdot \theta_b \cdot f'(h_1 \cdot a_1) \\
 (a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2) \cdot \gamma^2 \cdot \mu^2 \cdot \theta_2 &+ \\
 \gamma \cdot \mu \cdot (\theta_1 \cdot (a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2) \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \theta_2) &= h_2 \cdot \theta_b \cdot f'(h_2 \cdot a_2)
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Dans le cadre d'un équilibre non-coopératif et d'une tarification interne au prorata des superficies cultivées, les conditions de premier ordre deviennent :

$$\begin{aligned}
 \frac{n_1}{n_1 + n_2} \cdot ((a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2) \cdot \gamma^2 \cdot \mu^2 \cdot \theta_2 &+ \\
 \gamma \cdot \mu \cdot (\theta_1 \cdot (a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2) \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \theta_2)) &= h_1 \cdot \theta_b \cdot f'(h_1 \cdot a_1) \\
 \frac{n_2}{n_1 + n_2} \cdot ((a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2) \cdot \gamma^2 \cdot \mu^2 \cdot \theta_2 &+ \\
 \gamma \cdot \mu \cdot (\theta_1 \cdot (a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2) \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \theta_2)) &= h_2 \cdot \theta_b \cdot f'(h_2 \cdot a_2)
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Dans le cadre d'un équilibre non-coopératif et d'une tarification interne au prorata des consommations réelles, les conditions de premier ordre deviennent :

$$\begin{aligned}
 n_1 \cdot a_1 \cdot \gamma^2 \cdot \mu^2 \cdot \theta_2 &+ \\
 \gamma \cdot \mu \cdot (\theta_1 \cdot (a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2) \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \theta_2) &= h_1 \cdot \theta_b \cdot f'(h_1 \cdot a_1) \\
 n_2 \cdot \gamma^2 \cdot \mu^2 \cdot \theta_2 &+ \\
 \gamma \cdot \mu \cdot (\theta_1 \cdot (a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2) \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \theta_2) &= h_2 \cdot \theta_b \cdot f'(h_2 \cdot a_2)
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Les solutions obtenues sont, on le voit, singulièrement plus compliquées

à obtenir et à analyser dans un cadre général. On fera cependant plusieurs remarques importantes.

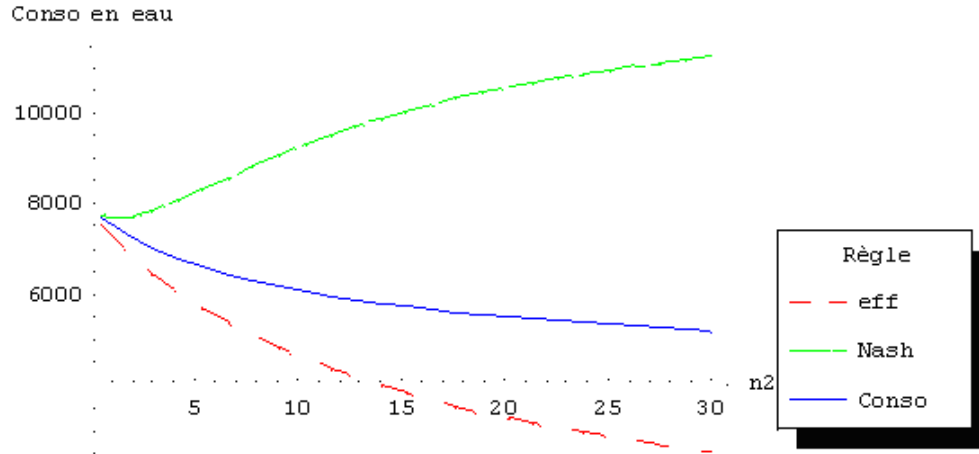


FIG. 4.2 – Impact de la superficie du producteur 2 sur les consommations en eau du producteur 1

Dans le cadre de la tarification binôme, les interactions stratégiques entre producteurs existent quelles que soient les règles internes de répartition des coûts d'extraction de l'eau. Contrairement au cas de la tarification uniforme, les producteurs prennent donc en compte la superficie de l'autre membre dans le calcul de leur consommation.

A titre d'exemple, la figure 4.2, illustre l'impact de la superficie relative d'un producteur au sein d'un puits sur sa consommation en eau, pour les trois types de règles internes évoquées jusqu'alors.

En abscisse sont représentées les superficies du producteur 2, en ordonnées sont représentées les consommations du producteur 1. Le producteur 1 est supposé posséder 5 hectares. On remarquera tout d'abord que l'équilibre efficace est toujours celui qui mène à la consommation la plus faible, quelles que soient les superficies. Par ailleurs, contrairement au cas de la tarification uniforme, la règle de paiement qui consiste à diviser les coûts d'extraction proportionnellement aux consommations ne permet pas d'éliminer complètement les interactions stratégiques entre producteurs. Ce type de règle est cependant « meilleur » que la répartition au prorata des surfaces en cas de non-coopération entre les membres du groupe.

Finalement, dans le cas d'une tarification au prorata des superficies, on retrouve l'idée que plus la part d'un producteur au sein du groupe est faible (ce qui se traduit sur la courbe par une augmentation de la superficie n_2), plus sa consommation par unité de surface est importante.

4.2.2 Efficience d'irrigation endogène

Dans un deuxième temps, nous levons l'hypothèse selon laquelle l'efficience d'irrigation ne provient pas d'une décision des producteurs. En effet, l'efficience d'irrigation dépend en grande partie du temps de travail fourni par le producteur pour contrôler son irrigation. On définira donc la fonction d'efficience $h(w)$, où w représente le temps de travail fourni par le producteur. $h(\cdot)$ est supposée croissante et concave.

On supposera par ailleurs que les producteurs ont le même niveau technique, ce qui implique que les producteurs possèdent la même fonction $h(\cdot)$ d'efficience mais fournissent des quantités de travail différentes en fonction de leurs coûts de travail (direct ou d'opportunité).

On suppose par ailleurs que la fonction $F(a, w) = f(h(w) \cdot a)$ est croissante et concave. Ce qui implique que les mineurs principaux de la matrice Hessienne des dérivées secondes sont de signes alternés, le premier étant strictement négatif (Chiang, 1984). Dans notre cas, les fonctions f et h doivent donc vérifier les équations :

$$h(w)^2 \cdot f''(h(w) \cdot a) < 0 \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \nu(a, w) = & f(h(w) \cdot a) \cdot (-f'(h(w) \cdot a) \cdot h'(w))^2 + \\ & a \cdot h(w) \cdot f''(h(w) \cdot a) \cdot (-2 \cdot h'(w)^2 + h(w) \cdot h''(w))) > 0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.2.2.1 Modèle coopératif

Dans le cas d'une mise en commun des profits, la fonction de profit devient :

$$\begin{aligned} \pi^2(a_1, w_1, a_2, w_2) = & n_1 \cdot \theta_b \cdot f(h(w_1) \cdot a_1) + n_2 \cdot \theta_b \cdot f(h(w_2) \cdot a_2) - \\ & c(n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2) - n_1 \cdot w_1 \cdot \theta_{w1} - n_2 \cdot w_2 \cdot \theta_{w2} \end{aligned} \quad (4.19)$$

où w_1 et w_2 représentent les quantités de travail fournies par les deux producteurs, et θ_{w1} et θ_{w2} représentent les coûts du travail pour chacun des deux producteurs du puits.

Les quatre équations pour les conditions de premier ordre pour l'obtention d'un maximum sont :

$$\begin{aligned}
-\gamma \cdot \mu \cdot \theta_e + \theta_b \cdot h(w_1) \cdot f'(h(w_1) \cdot a_1) &= 0 \\
-\theta_{w1} + a_1 \cdot \theta_b \cdot h'(w_1) \cdot f'(h(w_1) \cdot a_1) &= 0 \\
-\gamma \cdot \mu \cdot \theta_e + \theta_b \cdot h(w_2) \cdot f'(h(w_2) \cdot a_2) &= 0 \\
-\theta_{w2} + a_2 \cdot \theta_b \cdot h'(w_2) \cdot f'(h(w_2) \cdot a_2) &= 0
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Dans ce cas de figure, comme dans le premier modèle, on constate que chaque producteur réagit comme s'il était seul au niveau du puits. En effet, les solutions retenues en terme de consommation d'eau par les deux producteurs seront indépendantes des surfaces brutes et relatives des deux producteurs, et dépendent uniquement des prix relatifs de l'électricité et du travail pour chacun des producteurs. Elles correspondent également aux solutions que prendrait chacun des producteurs s'il était seul à gérer le puits.

4.2.2.2 Influence du coût de l'électricité sur les décisions de production

Si nous prenons les différentielles totales des équations régissant les conditions de premier ordre par rapport aux quatre variables de décision et la variable et que nous prenons les autres variables fixes, nous obtenons le système d'équation⁴ :

$$\begin{pmatrix} \pi_{a1,a1} & \pi_{a1,w1} & \pi_{a1,a2} & \pi_{a1,w2} \\ \pi_{w1,a1} & \pi_{w1,w1} & \pi_{w1,a2} & \pi_{w1,w2} \\ \pi_{a2,a1} & \pi_{a2,w1} & \pi_{a2,a2} & \pi_{a2,w2} \\ \pi_{w2,a1} & \pi_{w2,w1} & \pi_{w2,a2} & \pi_{w2,w2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} da_1 \\ dw_1 \\ da_2 \\ dw_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \pi_{a1,\theta_e} \\ \pi_{w1,\theta_e} \\ \pi_{a2,\theta_e} \\ \pi_{w2,\theta_e} \end{pmatrix} \cdot d\theta_e = 0 \tag{4.21}$$

La résolution de ce système d'équations, en utilisant la règle de Cramer et les règles d'inversion des matrices, nous donne après calculs et simplifications :

⁴Pour des raisons d'espace, nous adoptons ici la notation $\pi_{a1,a1} = \frac{\partial^2 \pi}{\partial a_1 \partial a_1}$

$$\left(\begin{array}{l} -\frac{a_1 \cdot \gamma \cdot \mu (a_1 \cdot h'(w_1))^2 f''(a_1 \cdot h(w_1)) + f'(a_1 \cdot h(w_1)) h''(w_1)}{\theta_b f'(a_1 \cdot h(w_1)) (f'(a_1 \cdot h(w_1)) \cdot h'(w_1)^2 + a_1 \cdot h(w_1) \cdot f''(a_1 \cdot h(w_1)) \cdot (2 \cdot h'(w_1)^2 - h(w_1) \cdot h''(w_1)))} \\ \frac{\gamma \cdot \mu \cdot h'(w_1) \cdot (f'(a_1 \cdot h(w_1)) + a_1 \cdot f''(a_1 \cdot h(w_1)))}{\theta_b f'(a_1 \cdot h(w_1)) (f'(a_1 \cdot h(w_1)) \cdot h'(w_1)^2 + a_1 \cdot h(w_1) \cdot f''(a_1 \cdot h(w_1)) \cdot (2 \cdot h'(w_1)^2 - h(w_1) \cdot h''(w_1)))} \\ -\frac{a_2 \cdot \gamma \cdot \mu (a_2 \cdot h'(w_2))^2 f''(a_2 \cdot h(w_2)) + f'(a_2 \cdot h(w_2)) h''(w_2)}{\theta_b f'(a_2 \cdot h(w_2)) (f'(a_2 \cdot h(w_2)) \cdot h'(w_2)^2 + a_2 \cdot h(w_2) \cdot f''(a_2 \cdot h(w_2)) \cdot (2 \cdot h'(w_2)^2 - h(w_2) \cdot h''(w_2)))} \\ \frac{\gamma \cdot \mu \cdot h'(w_2) \cdot (f'(a_2 \cdot h(w_2)) + a_2 \cdot f''(a_2 \cdot h(w_2)))}{\theta_b f'(a_2 \cdot h(w_2)) (f'(a_2 \cdot h(w_2)) \cdot h'(w_2)^2 + a_2 \cdot h(w_2) \cdot f''(a_2 \cdot h(w_2)) \cdot (2 \cdot h'(w_2)^2 - h(w_2) \cdot h''(w_2)))} \end{array} \right) \quad (4.22)$$

Ces expressions apparemment complexes se simplifient largement, si on les reformule à partir des différentielles de la fonction $F(a, w)$ et de son deuxième mineur $\nu(a, w)$. On retrouve alors que :

$$\frac{\partial a_1}{\partial \theta_e} = \frac{\gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 f(a_1 \cdot h(w_1))}{\partial w_1 \partial w_1}}{\theta_b \cdot \nu(a_1, w_1)} \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial \theta_e} = -\frac{\gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 f(a_1 \cdot h(w_1))}{\partial a_1 \partial w_1}}{\theta_b \cdot \nu(a_1, w_1)} \quad (4.24)$$

De même, pour le second producteur nous aurons :

$$\frac{\partial a_2}{\partial \theta_e} = \frac{\gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 f(a_2 \cdot h(w_2))}{\partial w_2 \partial w_2}}{\theta_b \cdot \nu(a_2, w_2)} \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial \theta_e} = -\frac{\gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 f(a_2 \cdot h(w_2))}{\partial a_2 \partial w_2}}{\theta_b \cdot \nu(a_2, w_2)} \quad (4.26)$$

Une augmentation du prix de l'électricité induit donc de manière non équivoque une baisse de la consommation en eau par les producteurs. Par contre les effets sur la consommation en travail dépendent des effets croisés entre travail et eau sur la fonction de production.

Les deux producteurs prenant leurs décisions de manière indépendante des superficies relatives au sein du puits, nous ne nous intéresserons donc pas à l'effet des variations de celles-ci sur les décisions de consommation.

4.2.2.3 Influence du coût du travail sur les décisions

Par le même procédé, on peut déterminer l'impact d'une variation du coût du travail d'un des producteurs (ici le premier) sur les décisions de production des deux producteurs. On obtient alors :

$$\frac{\partial a_1}{\partial \theta_{w1}} = - \frac{\frac{\partial^2 f(a_1 \cdot h(w_1))}{\partial a_1 \partial w_1}}{\theta_b \cdot \nu(a_1, w_1)} \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial \theta_{w1}} = \frac{\frac{\partial^2 f(a_1 \cdot h(w_1))}{\partial a_1 \partial a_1}}{\theta_b \cdot \nu(a_1, w_1)} \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial a_2}{\partial \theta_{w1}} = \frac{\partial w_2}{\partial \theta_{w1}} = 0 \quad (4.29)$$

Premièrement, on constate que l'augmentation du coût du travail pour l'un des producteurs, ne modifie en rien les décisions de consommation du deuxième producteur (Equation 4.29). Cela est normal puisque les décisions de consommation des deux producteurs sont indépendantes. Ensuite, on remarque que celle-ci crée, sans ambiguïtés, une diminution de la fourniture de travail. Cependant, l'évolution de la consommation en eau dépendra des effets croisés de l'utilisation de l'eau et du travail sur la production. On ne peut donc pas conclure sans ambiguïtés.

4.2.2.4 Paiement au prorata des surfaces et comportements non-coopératifs

Dans le cas d'un équilibre non-coopératif, et d'une règle de paiement à la surface, les fonctions de profit deviennent :

$$\pi_1^2 = n_1 \cdot (\theta_b \cdot f(h_1 \cdot a_1) - \frac{c(n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2)}{n_1 + n_2} - w_1 \cdot \theta_{w1}) \quad (4.30)$$

$$\pi_2^2 = n_2 \cdot (\theta_b \cdot f(h_2 \cdot a_2) - \frac{c(n_1 \cdot a_1 + n_2 \cdot a_2)}{n_1 + n_2} - w_2 \cdot \theta_{w2}) \quad (4.31)$$

La forme des courbes de coût et de profit assure normalement l'existence d'un équilibre unique. Les conditions de premier ordre pour la recherche d'un point d'équilibre nous ramène donc à la résolution d'un système de quatre équations à quatre variables a_1, w_1, a_2, w_2 :

$$\begin{aligned} \frac{n_1}{n_1 + n_2} \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \theta_e &= \theta_b \cdot h(w_1) \cdot f(a_1 \cdot h(w_1)) \\ \theta_{w1} &= a_1 \cdot \theta_b \cdot f'(a_1 \cdot h(w_1)) \cdot h'(w_1) \\ \frac{n_2}{n_1 + n_2} \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \theta_e &= \theta_b \cdot h(w_2) \cdot f(a_2 \cdot h(w_2)) \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\theta_{w2} = a_2 \cdot \theta_b \cdot f'(a_2 \cdot h(w_2)) \cdot h'(w_2)$$

Ces équations sont quasiment identiques celles obtenues précédemment dans le cadre d'un équilibre coopératif. Comme dans notre premier exemple, on notera cependant que dans les équations du système, le coefficient $\rho_i = \frac{n_i}{n_1+n_2}$ affecte les décisions de consommation en eau des deux producteurs. Comme nous l'avons noté dans le premier exemple, il existe donc des interactions stratégiques entre les deux producteurs.

De même, les producteurs ne prennent en compte que leurs propres coûts du travail et non pas celle de leurs partenaires dans leurs décisions de consommation en eau. Nous n'insisterons pas ici sur les conditions de second ordre qui sont vérifiées si les hypothèses sur les fonctions f et h sont respectées.

4.2.2.5 Influence du coût de l'électricité sur les décisions de production

Par le procédé décrit plus haut, on peut déterminer l'impact d'une variation des coûts de l'électricité sur les décisions de production des deux producteurs. Les mêmes types de calculs conduisent à, pour le premier producteur :

$$\frac{\partial a_1}{\partial \theta_e} = \frac{n_1 \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 f(a_1 \cdot h(w_1))}{\partial w_1 \partial w_1}}{(n_1 + n_2) \cdot \theta_b \cdot \nu(a_1, w_1)} \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial \theta_e} = - \frac{n_1 \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 f(a_1 \cdot h(w_1))}{\partial w_1 \partial w_1}}{(n_1 + n_2) \cdot \theta_b \cdot \nu(a_1, w_1)} \quad (4.34)$$

Et pour le deuxième producteur :

$$\frac{\partial a_2}{\partial \theta_e} = \frac{n_2 \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 f(a_2 \cdot h(w_2))}{\partial w_2 \partial w_2}}{(n_1 + n_2) \cdot \theta_b \cdot \nu(a_2, w_2)} \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial \theta_e} = - \frac{n_2 \cdot \gamma \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 f(a_2 \cdot h(w_2))}{\partial w_2 \partial w_2}}{(n_1 + n_2) \cdot \theta_b \cdot \nu(a_2, w_2)} \quad (4.36)$$

A partir d'hypothèses moins contraignantes que dans notre premier exemple, les dernières équations nous confirment l'intuition que nous avons acquise selon laquelle une augmentation des tarifs d'électricité aura un impact moins

important sur les consommations en eau au sein des puits collectifs qu'au sein des puits individuels. Le caractère collectif amortit donc les effets des politiques de prix de l'électricité sur les décisions de production.

4.3 Interactions pour la disponibilité de la ressource et risques de production

Nous avons vu que les règles d'allocation des coûts entre les producteurs d'un puits collectif pouvaient créer des interactions stratégiques entre les producteurs et ainsi générer des incitations économiques à consommer plus d'eau qu'ils ne le feraient dans le cas d'un puits géré individuellement. Les règles d'allocation des coûts ne sont cependant pas le seul facteur de création d'interactions stratégiques entre producteurs. Nous aborderons maintenant l'organisation des puits et leur implication sur la demande en eau. Ceci nous amènera à évaluer les règles d'allocation de la ressource entre les différents producteurs.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre antérieur, la gestion collective impose des contraintes de tour d'eau. Comme le débit d'un puits est peu important, l'eau qu'il fournit n'alimente en eau qu'une seule parcelle à la fois. Les producteurs obtiennent donc le droit d'utiliser l'eau du puits selon une séquence prédéterminée. Le tour d'eau évite l'anarchie dans l'utilisation de l'eau, mais ne permet pas, en général, un contrôle de la durée totale du tour d'eau. Comme chaque producteur décide librement du temps d'irrigation, la durée totale du tour d'eau est le résultat d'une agrégation de comportements individuels.

L'eau d'irrigation, durant le cycle d'hiver vient en complète substitution à l'eau de pluie. La pluviométrie est pratiquement nulle durant cette période, l'eau d'irrigation est donc la seule source d'eau pour les plantes durant cette période. Quand la capacité du puits est faible en regard avec le nombre d'utilisateurs, le puits fonctionne en continu durant les périodes critiques (février-avril) qui correspondent à des besoins importants de la plante et à une forte évapotranspiration.

Dans ce cas, quand le producteur irrigue sa parcelle, la plus grande inconnue est la date de la prochaine irrigation. Dans les périodes critiques de

la formation du rendement, qui correspondent également aux périodes les plus sèches, un stress hydrique peut avoir des conséquences importantes sur le rendement. Par ailleurs, les risques liés à un apport trop important d'eau sont jugés faibles.

On comprend alors la stratégie *anti-risque* du producteur qui consiste à apporter la lame d'eau maximale quand il irrigue, c'est à dire quand il possède lui-même la main d'eau. Cependant, cette stratégie agrégée au niveau de tout le groupe tend à allonger le tour d'eau, et à rendre le risque de stress hydrique plus important. La tension entre les rationalités individuelles et la logique collective conduit potentiellement à un allongement des délais de retour des irrigations. Le fonctionnement social des puits ne parvient à garantir, ni les irrigations en temps et en heure, ni la confiance dans le collectif. Ce manque de confiance est sans doute la clé de voûte de l'ensemble de la gestion de l'eau au sein des groupes et son absence perdure tant que la rationalité individuelle contredit le gain collectif et/ou n'est pas contre-balançée par un minimum d'autorité. Seul un changement des règles de distribution semble pouvoir arrêter cette spirale. Ce changement apparaît avec le besoin de contrôler les intérêts individuels pour le bénéfice du groupe. Chaque membre du groupe, bien qu'ayant un intérêt direct à augmenter sa consommation, a également intérêt à s'assurer que la sur-consommation de ses collègues ne viennent affecter ses espérances de profit. Alors que le producteur a tendance à oublier les externalités négatives qu'il crée sur ses voisins, il ne peut ignorer les externalités négatives des autres à son encontre (Bromley, 2000). Les règles institutionnelles acceptées par le groupe représentent donc un compromis établi entre intérêts individuels et intérêts collectifs.

De fait, certains groupes réduisent cette incertitude, en donnant une limite supérieure de temps pour l'irrigation. Dans beaucoup de cas, cependant, les temps d'irrigation ne sont pas limités. Cela peut simplement exprimer que les contraintes sur la ressource en eau ne sont pas fortes (puits bien dimensionné par rapport à la consommation) ou que l'équilibre des forces entre les partisans de règles collectives fortes et les partisans de règles collectives peu contraignantes va en faveur des seconds.

On remarquera enfin que la règle qui définit les temps d'irrigation alloués à chacun des membres du groupe lève certaines ambiguïtés dans la définition des droits d'accès à l'eau de puits qui existe dans la plupart des puits. En

effet, on passe d'une définition globale de l'accès « je sais que j'ai accès à l'eau », à une définition plus explicite de cet accès « j'ai accès à l'eau 15 heures par mois ».

Cependant, une meilleure définition des droits d'accès n'est pas toujours nécessaire quand le contrôle social entre les différents membres du groupe est suffisant (rappel à l'ordre quand un producteur prend trop de temps pour irriguer et compromet ainsi le rendement des autres producteurs) et/ou que la pression sur l'eau est faible (l'ensemble des sur-irrigations ne créent pas de problèmes sur les rendements de chacun, car la marge entre deux tours d'eau est relativement importante).

4.4 Conclusions

Les producteurs gérant en commun un puits ont des contraintes et des incitations économiques qui diffèrent de celles des producteurs gérant en groupe un puits. Nous avons montré de manière stylisée dans quelle mesure les règles d'allocation rencontrées sur le terrain accentuent ou permettent de limiter les effets négatifs anticipés de ces interactions stratégiques.

Dans la section 4.2 nous avons fait une représentation stylisée des interactions entre producteurs au niveau des puits collectifs : deux producteurs uniquement, fonctions de productions simples, tarification uniforme et binôme. De même, nous avons montré que la présence de risques de production pouvait générer des interactions stratégiques entre producteurs (section 4.3).

Ces modèles stylisés doivent maintenant être complétés par des modèles plus détaillés de la réalité observée. Nous aborderons ici le cahier des charges de tels modèles. Concrètement, on cherchera à représenter de manière réaliste le fonctionnement d'un puits collectif. Le puits collectif sera géré par un nombre supérieur à deux de producteurs. Au sein du puits collectif, les producteurs se différencient par leur dotation en facteur (terre, terre irrigable, travail, capital), et par leurs comportements (aversion au risque). Un environnement de production avec des techniques définies existe pour la région, de même qu'un marché pour les principaux facteurs (capital, travail). Chaque producteur a donc le choix entre différentes activités, définies ici comme des productions agricoles ou non-agricoles. Dans le cas des activités agricoles, chaque production pourra être déclinée selon des variantes techniques (no-

tamment autour de l'économie de l'eau). Les solutions techniques devront être détaillées afin de pouvoir représenter de manière concrète les contraintes auxquelles devront faire face les producteurs, et leurs implications en terme de risque sur les rendements. Les prix des facteurs, et d'une manière plus générale, le contexte macro-économique influencent les décisions des producteurs.

Au niveau du puits collectif, les décisions des producteurs prennent place simultanément, et de manière discrète dans le temps (début de chaque saison agricole pour les décisions stratégiques). Le caractère simultané des décisions implique des interactions stratégiques entre les différents producteurs du groupe. Les producteurs ont mis en place un certain nombre de règles d'allocation de la ressource, et des coûts afférents à son extraction. Ces règles influencent directement les choix des producteurs, soit en imposant des contraintes supplémentaires, soit en modifiant les anticipations des producteurs sur les coûts et bénéfices des productions envisagées.

De cette proposition de modélisation découle le plan de route pour les prochains chapitres. Nous présenterons tout d'abord les techniques d'irrigation à la disposition des producteurs et les contraintes afférentes. Le recours à la modélisation biophysique nous permettra de présenter de manière synthétique ces différents aspects, ce sera l'objet du chapitre 5.

Une fois le référentiel technique et les méthodes d'élaboration décrites, nous décrirons le processus de décision individuel des producteurs. Le caractère individuel de la décision ne veut pas dire ici que le producteur ignore la présence des autres, mais qu'il réalise un certain nombre d'anticipations sur le comportement des autres, avant de réaliser ses choix de production. Ce sera l'objet du chapitre 6. Enfin, le chapitre 7 nous proposera la description du modèle intégrant les différents producteurs.

Chapitre 5

Décisions d'irrigation à la parcelle : quelles options pour le producteur, et quels degrés de liberté

5.1 Introduction

Si on cherche à analyser, voire prédire, les réactions des producteurs aux instruments de politique agricole, on doit comprendre et être à même de reproduire leurs décisions actuelles. Traditionnellement, les écrits économiques utilisant la théorie néo-classique représentent les décisions de production par le biais de fonctions de production. Nous n'avons pas failli à cette tradition dans les approches théoriques du chapitre 4.

Le passage du travail théorique au travail empirique suppose la description explicite de ces fonctions de production. Ceci a donné lieu, dans la littérature, à divers exercices de modélisation, depuis l'estimation économétrique de fonctions de production, à l'utilisation de modèles de plantes comme substitut aux fonctions économétriques (Vicien, 1991), en passant par des modèles de bilan hydrique ayant le même rôle. Nous ferons donc un rapide tour d'horizon des méthodes employées dans la littérature économique.

Nous essaierons de montrer, par une description fine des irrigations et du contexte dans lequel elles prennent place, que les relations entre consomma-

tion en eau et rendements ne peuvent pas facilement se réduire à des fonctions de production. En effet, les contraintes afférentes à l'irrigation à la raie et la sensibilité de ces performances aux conditions de milieu (humidité du sol, notamment) au moment où elle se réalise font que le producteur peut appliquer des quantités d'eau, brutes et nettes, très variables pour une même pratique. En d'autres termes, une même pratique donnera des quantités d'eau apportées très différentes en fonction du déficit hydrique du sol au moment où se réalise cette irrigation.

La décision du producteur, plus qu'un choix direct d'une quantité d'eau appliquée, sera donc décrite ici comme un choix entre différentes options d'irrigation que nous définirons plus précisément dans le texte. Les quantités d'eau consommées seront alors à considérer comme la conséquence de choix d'une option d'irrigation plutôt qu'un choix direct de dose d'applications.

Au-delà d'une meilleure représentation des pratiques d'irrigation, l'interprétation des décisions afférentes à l'irrigation comme choix d'option d'irrigation présente plusieurs avantages. Le concept d'option d'irrigation permettra en effet d'évaluer explicitement les interactions entre consommation en eau, effets sur les rendements et leur variabilité, et temps de travaux. Il permettra enfin de conceptualiser les décisions des producteurs au sein d'un groupe partageant une ressource commune. En effet, on peut imaginer que le choix d'une option se fera en fonction des choix des autres membres du groupe. Ce qui nous permettra d'envisager, par la suite, les choix tactiques d'un producteur en fonction des décisions des autres producteurs.

5.2 Les relations entre consommation en eau et rendements : les modèles utilisés dans la littérature économique

La littérature économique s'intéresse essentiellement à expliciter une relation entre eau appliquée et rendements. En effet, elle évacue, en général, les problèmes d'application de l'eau d'irrigation par le biais d'une efficience d'irrigation déterminée de manière exogène et liée à une technique et au savoir-faire des producteurs (cf. également chapitre 4).

Dans cette section nous ferons une revue rapide des modèles utilisés pour représenter cette relation eau-rendements. Trois grandes familles de modèles sont utilisées dans les études à dominante économique : fonctions de production, modèles de simulation des plantes, et modèles de bilan hydrique. Nous les présentons ici.

5.2.1 Fonctions de production estimées

Les fonctions de production, estimées à partir de données expérimentales ou de données observées chez les producteurs, ont été largement utilisées par les économistes de l'eau. Heady et Dillon (1972) ont utilisé les concepts de la théorie micro-économique standard pour développer les fonctions de production agricoles. Ils mettent cependant en garde les futurs utilisateurs que les résultats obtenus doivent être pris avec beaucoup de précaution : les fonctions de production ne sont valides que pour les conditions sous lesquelles elles ont été estimées et sur l'intervalle de valeurs des variables indépendantes pris dans l'échantillon qui a servi à son estimation.

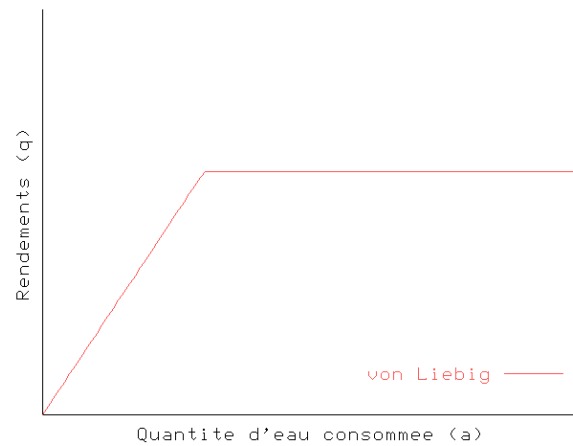
Plusieurs fonctions de production ont été utilisées dans la littérature. La fonction de Cobb-Douglas $Y = \theta \cdot \beta_1 \cdot \prod_{i=2}^n X_i^{\beta_i}$ où les β_i sont les élasticité de la production par rapport au facteur eau et aux autres intrants a des propriétés analytiques intéressantes. Elle présente cependant de gros inconvénients : le signe de l'effet marginal d'un intrant est constant et elle ne peut être utilisée pour des effets négatifs sur le rendement d'une surconsommation d'eau. Elle a néanmoins été utilisée, par exemple, dans Moore et al. (1993) pour estimer les fonctions de production de 13 cultures à partir de données empiriques. Moore et ses collègues utilisent ces fonctions pour évaluer l'impact d'une diminution de l'offre en eau sur l'agriculture et les possibilités de substitution d'intrants (par changement technique) pour compenser cette diminution.

Les fonctions polynomiales sont plus largement utilisées (Hexem et Heady, 1978 ; Vaux et Pruitt, 1983 ; Dinar *et al.*, 1991), notamment la fonction quadratique. Celle-ci s'exprime, dans le cas de deux intrants : $Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_1 \cdot X_2 + \beta_4 \cdot X_1^2 + \beta_5 \cdot X_2^2$. La fonction quadratique permet, contrairement à la fonction de Cobb-Douglas, de décrire les situations où une surconsommation en eau induit une baisse de rendements (le rendement marginal de l'eau devient négatif au delà d'un certains seuil de

consommation). Cependant, l'une des difficultés afférentes à l'utilisation de ce type de fonction est que l'on trouve peu de données observées dans la zone de rendements décroissants, les paramètres estimés sont donc biaisés (Dinar et Letey, 1996). Une autre contrainte de ce type de fonction est la constance du déclin du rendement marginal. Pour éviter ce problème d'autres auteurs utilisent la racine carrée des variables dépendantes.

La fonction de von Liebig (Berck et Helfland, 1990 ; Letey, 1991) a également été largement employée, notamment par les équipes californiennes. Elle s'exprime dans le cas du seul intrant eau comme :

$$\begin{aligned} y_i &= h \cdot a & \text{si } a < a_{max} \\ y_i &= y_{max} & \text{si } a \geq a_{max} \end{aligned}$$



où h représente l'efficience d'irrigation. Cette efficience d'irrigation est généralement une constante définie pour une technique d'irrigation donnée. Elle sert de base à de certaines études théoriques et empiriques sur l'irrigation (Caswell et Zilberman, 1986 ; Caswell *et al.*, 1990 ; Carey et Zilberman, 2002). Elle a été estimée à partir de données expérimentales par Paris et Knapp (1989). Ils montrent que la fonction de von Liebig est supérieure aux fonctions polynomiales. Cependant, elles sont plus exigeantes en données expérimentales, rendant leur application concrète difficile (Dinar et Letey, 1996).

De nombreuses études économiques sur la gestion de l'eau reposent donc sur l'estimation de fonction de production, reliant le rendement des cultures avec la consommation en eau et éventuellement en autres intrants. Cependant le domaine de validité de ces fonctions de production reste limité dans l'espace et dans le temps. De plus, leur estimation nécessite un nombre important de données. Par ailleurs, les fonctions de production fonctionnent comme des

« boîtes noires » et occultent le fait qu'une même dose d'eau, appliquée à des moments différents dans la saison puisse conduire à des rendements différents.

Enfin, du fait des relations univoques trouvées dans les fonctions de production, on est limité sur le nombre d'options de gestion de l'eau qui pourront être étudiées, comme la variation des périodes et des durées d'irrigation. Ce dernier point réduit considérablement l'intérêt de ce type d'approche pour notre travail.

5.2.2 Les modèles de simulation

Les modèles bio-économiques que l'on rencontre dans la littérature économique utilisent des modèles de plantes plus élaborés où interagissent différents intrants, eau et engrais (voir par exemple Semaan, 2001). Différents modèles spécifiques d'une plante, CERES pour le maïs, GOSSYM pour le coton existent et permettent d'analyser l'impact des pratiques d'irrigation sur les rendements. Un exemple d'utilisation de ce type de modèle est le développement de COTMOD qui est un développement de GOSSYM permettant d'évaluer les effets de différents calendriers d'irrigation et de fertilisation. Des modèles génériques permettant de générer plusieurs plantes ou types de plantes comme CROPSYST (Stockle *et al.*, 1994) ou EPIC (Jones *et al.*, 1991) ont également été développés. Ces modèles permettent d'obtenir des séries de rendements de cultures pour différents calendriers culturaux et d'irrigation. L'utilisation de ces deux derniers modèles pour l'évaluation des politiques de gestion de la demande en eau est très répandue (quelques exemples : Donaldson *et al.*, 1995 ; Flichman, 1995 ; Oglethorpe et O'Callaghan, 1995). Cependant, ces modèles demandent normalement un grand nombre de données expérimentales pour leur calibrage et leur validation.

5.2.3 Les modèles de bilan hydrique¹

Pour faire face aux limitations des fonctions de production, et analyser des situations en l'absence de données expérimentales fouillées, certains travaux se sont basés sur l'utilisation de modèle de bilan hydrique. Le développement

¹Cette section doit beaucoup aux différentes présentations des modèles de bilan hydrique au sein du CIRAD (Franquin et Forest, 1977 ; Baron *et al.*, 1996 ; Muller *et al.*, 1998).

de modèles génériques de bilan hydrique relativement aisés d'utilisation, et peu demandeurs en données comme CROPWAT (FAO, 1992a) n'est peut-être pas non plus étranger à l'utilisation de ces modèles par les économistes.

Ces modèles partent du principe simple que l'évapotranspiration, c'est à dire l'eau transpirée par les plantes auquel on ajoute l'évaporation du sol, explique mieux le rendement que l'eau amenée à la parcelle (Vaux et Pruitt, 1983). Le modèle de bilan hydrique permet de calculer le rendement associé à la culture modélisée par le biais de la relation (Doorenbos et Kassam, 1987) :

$$1 - \frac{Y}{Y_m} = K_y \cdot \left(1 - \frac{ET}{ETM}\right) \quad (5.1)$$

où

- Y est le rendement en matière sèche lorsque le seul facteur contraignant éventuel est l'alimentation hydrique (autres facteurs à l'optimum)
- Y_m est le rendement potentiel maximum en matière sèche
- ET est l'évapotranspiration sur une période (phase végétative) ou l'ensemble du cycle.
- ETM est l'évapotranspiration maximale.
- K_y est le coefficient de réponse du rendement à la contrainte hydrique spécifique d'une période végétative, ou pour l'ensemble du cycle.

Y_m , K_y et ETM sont des coefficients spécifiques d'une région et d'une culture et doivent être connus. ET doit être estimée ou mesurée. On peut estimer ET par le biais de l'équation générale du bilan hydrique. Celle-ci exprime la conservation de la masse d'eau dans le système sol/plante/atmosphère. Sous sa forme simplifiée, il s'écrit entre deux dates :

$$I + P = ET + Dr + R + \Delta Stock \quad (5.2)$$

avec

- I est l'apport en eau par irrigation.
- P est la pluie. Il s'agira des données réelles de pluviométrie observées ou de données simulées à partir des données climatiques mensuelles.
- Dr est le drainage profond
- R est le ruissellement
- $\Delta Stock$ est la variation de stock de l'eau du sol.

Les supposés sont les suivants :

- On calcule avec un pas de temps journalier
- On ne sépare pas l'évaporation du sol et la transpiration de la culture
- Le réservoir sol est variable et fonction de la profondeur d'enracinement
- On décrit chaque culture par un coefficient cultural (K_c) variant en fonction du temps (Walker, 1989 ; FAO, 1992a) ;
- On calcule l' ET de la culture par une fonction de l' ETM ($ETM = K_c \cdot ETO$), et du niveau de remplissage de la réserve utile du sol (calculé à chaque pas de temps par le modèle).

Bien que ces relations soient établies pour une large gamme de cultures et de milieux, elles doivent être utilisées en connaissant leurs limites. En effet, elles ne sont valides que quand le seul facteur limitant est l'eau. On ne prend donc pas en compte d'éventuelles interactions entre les différents facteurs qui agissent sur le développement de la culture. Cette approche ne nous permettra pas, par exemple, de traiter des interactions entre irrigation et fertilisation azotée.

Les atouts majeurs de cette approche sont sa robustesse et un besoin moins important de paramètres que les autres approches.

Ce type de modèle de bilan hydrique est également largement utilisé dans la littérature économique. Strosser utilise CROPWAT pour l'estimation des besoins en eau des cultures afin d'évaluer le potentiel des marchés de l'eau au Pakistan (Strosser, 1997). León l'utilise pour l'évaluation économique de projet d'irrigation (León, 2002). Faysse l'utilise pour modéliser l'impact des règles d'allocation de l'eau au sein d'un périmètre sur les décisions de production (Faysse, 2002). Du fait de sa robustesse, c'est également la méthode que nous avons retenue pour notre modèle.

5.2.4 Conclusion

Les trois grandes familles de modèles utilisés par les économistes pour représenter les relations entre les consommations en eau et les rendements sont les fonctions de production, les modèles de simulation et les modèles de bilan hydrique. Chacune de ces méthodes présente avantages et inconvénients que nous avons passé brièvement en revue.

Par manque de données expérimentales sur les interactions entre eau et les

autres intrants, notamment l'azote, et par souci de concentrer notre discours sur l'intrant eau, nous avons considéré l'utilisation du bilan hydrique comme la plus satisfaisante. En effet, la robustesse des résultats obtenus en fait un outil relativement aisé d'utilisation et transposable.

Cependant, la spécification de la relation eau-rendement ne doit pas nous faire perdre de vue que les producteurs ont des contraintes d'application de l'eau liées aux conditions du milieu et aux techniques dont ils disposent dans le moyen terme. C'est l'objet de la section suivante.

5.3 Description de l'irrigation à la raie

5.3.1 Pourquoi seulement l'irrigation à la raie

Nous nous plaçons dans le cadre de l'irrigation à la raie uniquement car dans le contexte du Bajío :

- Le passage à l'irrigation par aspersion n'apparaît pas comme une alternative technique intéressante : la présence de vents importants et les difficultés d'application liées à la nature des sols (vertisols) rend l'aspersion peu attrayante pour les producteurs.
- Le passage à l'irrigation de type arrosage localisé à basse pression, appelé communément « goutte à goutte » suppose également un investissement conséquent peu compatible avec les systèmes de production céréaliers (même si des systèmes sont à l'étude actuellement).

Ces deux dernières techniques engendrent également, dans le cas des puits collectifs, des problèmes organisationnels importants. Elles supposent en effet la mise en pression de l'eau apportée aux parcelles, et donc une gestion différente de l'organisation des arrosages. En outre, dans le cas du goutte à goutte, elle nécessite une coordination plus importante des différents producteurs car plusieurs parcelles doivent être arrosées en même temps.

Dans les faits, lors des nombreuses enquêtes réalisées dans la région, nous n'avons rencontré qu'un seul cas de transition à l'arrosage localisé dans un puits collectif². Ce puits rencontrait d'ailleurs des problèmes organisationnels

²Les systèmes d'arrosage localisés sont en progression dans la région, mais elle concerne essentiellement les puits gérés individuellement et correspondent alors également à une transition vers les systèmes de cultures maraîchers

certains malgré la bonne volonté initiale des membres du groupe, amenant certains d'entre eux à regretter la transition vers le goutte à goutte. Nous plaçons donc notre étude dans le cadre de l'amélioration de l'utilisation de l'irrigation à la raie qui semble être la seule alternative réalisable pour l'instant dans le cadre des puits collectifs.

5.3.2 Irrigation à la raie : principes de base

Dans l'irrigation à la raie, l'eau est appliquée individuellement à chaque raie en amont de la parcelle et s'écoule du seul fait de la gravité vers l'aval de la parcelle. L'eau s'infiltre alors progressivement le long de la raie.

Lors d'une irrigation on distingue quatre phases (Figure 5.1) :

- l'*avancement*, entre l'instant où l'eau commence à s'écouler et le moment où elle atteint l'extrémité aval de la raie ;
- l'*entretien*, entre l'instant où l'avancement est terminé jusqu'à l'instant où on coupe l'alimentation ;
- la *déplétion*, entre l'instant où l'alimentation est coupée jusqu'au moment où l'eau commence à disparaître dans la raie en amont ; Cette phase est en général négligée.
- la *récession*, correspondant à la période pendant laquelle l'eau disparaît de la raie. La durée d'infiltration de l'eau dans le sol correspond à la différence entre l'instant où l'avancement s'est manifesté à une distance et l'instant où la récession est vérifiée à cette même distance. Cette durée étant fonction de la distance par rapport à l'amont de la parcelle, les quantités infiltrées varient donc le long de la raie.

Pour une configuration de raie donnée (longueur, pente, espacement et forme des raies), la gestion de l'irrigation à la raie se résume donc à trouver une combinaison débit-durée qui apporte une quantité déterminée d'eau à la parcelle, selon un profil d'infiltration le plus uniforme possible et avec le minimum de pertes en colature ou par percolation. Les débits unitaires (à chaque raie) ne seront donc pas trop importants de façon à favoriser l'infiltration de l'eau pendant qu'elle s'écoule, sans provoquer ni de pertes excessives en colature, ni l'érosion du sol durant l'écoulement. Cependant les débits ne peuvent être trop petits pour que l'eau ne s'infiltre pas en excès dans la partie amont des raies, et provoquerait ainsi des pertes par percolation profonde

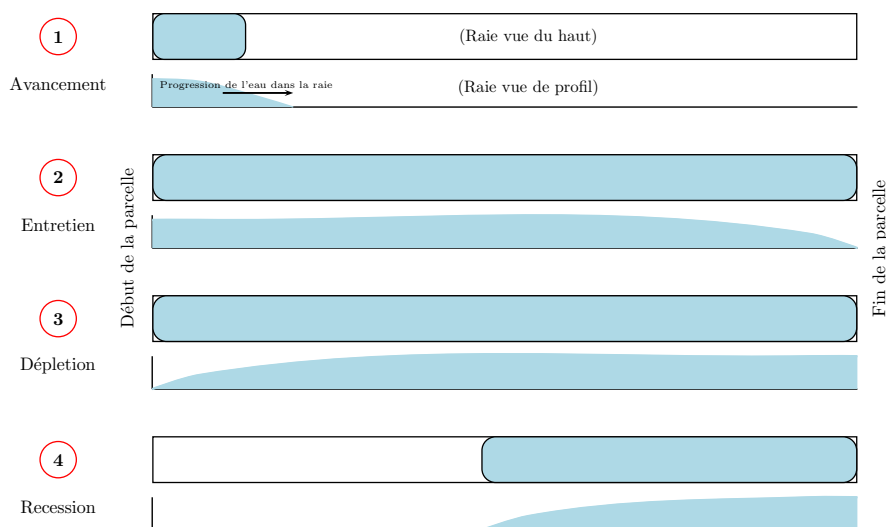


FIG. 5.1 – Les différentes phases de l'irrigation à la raie

(Tiercelin, 1998, p. 450).

Le sol qui doit conduire l'eau le long de la parcelle a des propriétés qui varient dans l'espace et dans le temps. Au-delà du problème initial de conception du système d'irrigation, les paramètres importants d'irrigation, débit en tête et temps d'irrigation, doivent être ré-évalués par le producteur avant chaque irrigation. Inversement, un même couple débit-temps appliqué dans des conditions de milieu différentes amènerait des performances d'irrigation différentes. Il est donc important de noter que nous n'aurons pas une relation rendement = $f(\text{eau consommée})$ simple.

5.3.3 Simulation de l'irrigation au niveau d'une raie

Au vu du grand nombre de paramètres affectant les performances de l'irrigation, le recours à la modélisation est nécessaire pour quantifier les relations entre pratiques et performances d'irrigation. A l'échelle de la raie, notre modèle devra nous permettre d'évaluer dans des conditions de milieu connues, pour un couple débit-temps donné, les doses infiltrées dans le sol en fonction de la distance par rapport à la tête de la parcelle. Cela permettra donc d'établir un profil d'infiltration et d'obtenir une première évaluation des pertes en colature et des pertes par percolation profonde.

Le phénomène physique de l'irrigation à la raie comporte l'infiltration dans la section transversale de la raie et l'avancement de l'eau en surface. Les sols caractéristiques de la région sont des vertisols. Les vertisols sont des sols ayant une forte proportion d'argiles gonflantes dans lesquels se forment, en conditions sèches, de profondes fentes de retrait (FAO, 2000). Les modèles d'avancement et d'infiltration utilisés proviennent des travaux théoriques et empiriques réalisés sur ce type de sols. En effet, nous avons repris les principales caractéristiques du modèle RAIEOPT (Mailhol, 1992 ; Mailhol, 2001).

Notre propos n'est pas ici de rentrer dans une description trop « technique » du modèle développé et bien décrit par ailleurs par des spécialistes en hydraulique de l'irrigation (Mailhol, 2001). Nous essaierons cependant de faire une présentation suffisamment explicite pour notre propos essentiellement économique.

Le sol est assimilé à un système à deux réservoirs. Le premier réservoir correspond aux fentes de retrait, caractéristiques des vertisols, dont le remplissage est instantané. Le second correspond aux micro-porosités dont le remplissage linéaire s'effectue plus ou moins lentement selon la vitesse d'infiltration stabilisée. La loi d'infiltration cumulée choisie est donc :

$$Z = B + C_s \cdot t \quad (5.3)$$

où Z correspond à la dose infiltrée cumulée (l.m^{-1}), B est le volume instantané de l'eau infiltrée par unité de longueur de raie (l.m^{-1}), C_s est l'infiltration stabilisée ($\text{l.m}^{-1}.\text{mn}^{-1}$), et t est le temps d'infiltration. Cette version linéaire relativement simple de loi d'infiltration est une version simplifiée de lois d'infiltration beaucoup plus complexes, mais qui a donné des résultats empiriques satisfaisants sur les vertisols (Mailhol, 2001).

Les auteurs montrent que cette loi d'infiltration présente l'avantage d'induire une solution exacte de l'avancement de l'eau dans la raie en fonction des caractéristiques du sol (B et C_s) et de la géométrie des raies.

$$x(t) = \frac{Q}{C_s} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t \cdot C_s}{A_0 \cdot \sigma + B}\right) \right) \quad (5.4)$$

où $x(t)$ correspond à l'avancement de l'eau le long de la raie, σ est le coefficient de forme de la ligne d'eau estimé à 0,8, A_0 est la section mouillée estimée par

la formule de Manning-Strickler pour une raie standard de forme trapézoïdale.

Le paramètre B , qui correspond au volume des fentes de retrait (l.m^{-1}) est dépendant de l'état physico-chimique du sol (taux de matière organique, par exemple) que l'on considèrera constant dans un premier temps puisque l'évolution de ces propriétés est relativement lente (pas de temps de plusieurs années). Mais ce volume est également très lié à l'humidité relative du sol : Mailhol (2001, p. 186) établit une relation linéaire entre ce coefficient B , et le déficit hydrique de la parcelle que nous utiliserons ici après adaptation aux conditions du Bajío.

Le coefficient C_s est lui aussi dépendant des qualités physico-chimiques du sol, mais il est considéré indépendant de l'humidité relative du sol. La variable caractéristique d'une parcelle est le C_{s0} , infiltration stabilisée pour un débit de 1 litre/s. L'application de la formule de Manning-Strickler au débit de 1 l/s nous permet d'obtenir le périmètre mouillé P_0 . On obtient ensuite le coefficient C_s par l'application de la formule : $\frac{C_s}{P} = \frac{C_{s0}}{P_0}$, où P est le périmètre mouillé pour un débit donné. La connaissance de C_s , nous permet ensuite de calculer L_m , i.e. la longueur maximale que le front atteindrait si l'eau coulait dans la raie à un débit donné, et pour une période de temps infinie : $L_m = \frac{60 \cdot Q}{C_s}$. Pour un couple de paramètres B et C_s donné, nous pouvons donc calculer le temps d'avancement de l'eau le long de la raie :

$$T_{av}(x) = -\frac{\ln(1 - \frac{x}{L_m})}{\alpha} \quad (5.5)$$

où $\alpha = \frac{C_s}{(\sigma \cdot A_0 + B)}$

On complète le modèle par une loi qui calcule le temps de récession :

$$T_{rec}(x) = \left(\frac{x}{60 \cdot \sqrt{S_0} \cdot C_s^{0.66}} \right)^{3/5} \quad (5.6)$$

Le temps d'infiltration T_{inf} est donc égal à $T_{inf}(x) = Dur - T_{av}(x) - T_{rec}(x)$ où Dur est la durée de l'irrigation, T_{av} est la durée de la période d'avancement, et t_{rec} est la durée de la période de récession.

Une fois connu le temps d'infiltration, on peut calculer l'infiltration cumulée en tout points de la raie, grâce à la loi d'infiltration linéaire décrite précédemment (équation 5.3)

5.3.4 Les critères d'évaluation hydrauliques : premiers éléments quantitatifs d'analyse des pratiques d'irrigation

Comme nous l'avons remarqué dans la section 5.3.2 la quantité d'eau apportée en tête de raie n'est pas intégralement utilisée par les plantes. Plusieurs critères d'évaluation des arrosages à la raie ont donc été mis en place (Walker, 1989 ; Tiercelin, 1998).

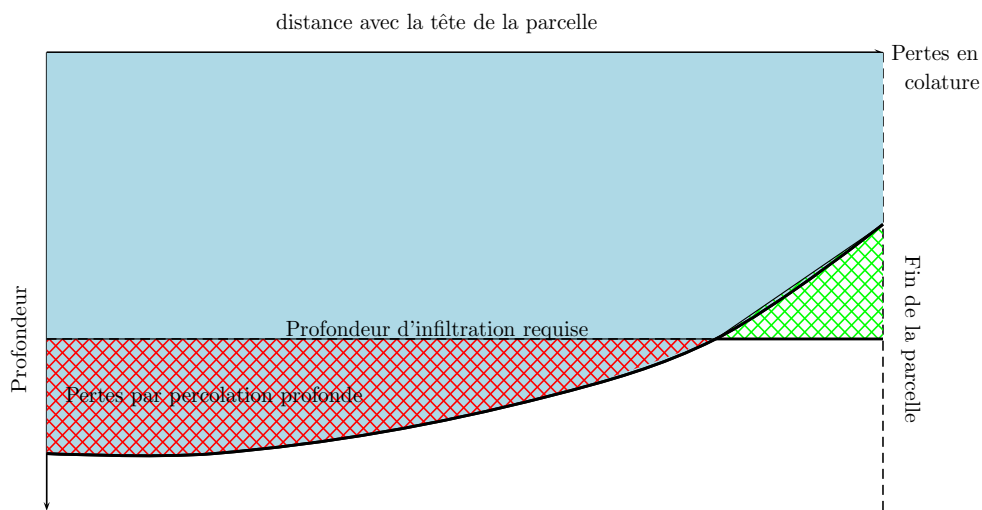


FIG. 5.2 – Les composantes de l'efficacité d'irrigation

La quantité d'eau apportée en tête de raie est appelée *volume brut* (V_b). Seule une partie est utilisable par les plantes, celle-ci est appelée le *volume net* (V_n) qui correspond à la quantité d'eau stockée dans la zone racinaire. Le reste est perdu en bout de raie, que l'on nomme alors des *pertes en colature* (V_c) ou par *infiltration profonde* (V_p) (Figure 5.2). On appellera *dose infiltrée* (DI), la dose brute diminuée des pertes en colature, et *dose nette* (DN), la dose infiltrée diminuée des pertes en percolation profonde. La qualité d'un arrosage est donc traditionnellement mesurée par différents indicateurs, nous en utiliserons ici deux, l'uniformité et le rendement net. Le *coefficient d'uniformité* (CU) est égal au ratio de la dose nette sur la dose infiltrée. Le *rendement net* (RN) est égal au ratio de la dose nette sur le volume brut. La dose nette est calculée en prenant la moyenne des doses infiltrées dans le der-

nier quart de la parcelle (Merriam et Keller (1978), cité dans Walker, 1989). La dose infiltrée est la moyenne des doses infiltrées le long de la raie. Les paramètres B et C_{s0} sont obtenus après calage du modèle sur des données observées d'avancement. Nous utilisons des valeurs moyennes observées lors d'observations d'avancement réalisées dans la région à différentes périodes de l'année pour renseigner les modèles.

5.3.5 Présentation du concept d' « *option d'irrigation* »

On définira ici une option ou tactique d'irrigation comme un ensemble de règles objectives que le producteur utilisera pour déterminer les deux paramètres de conduite de son irrigation : nombre de raies ouvertes, et temps d'irrigation.

Plusieurs tactiques d'irrigation sont envisageables. Nous en avons repéré trois. La première représente un producteur qui cherche à valoriser au mieux l'eau d'irrigation. Quand il obtient la main d'eau, celui-ci calcule la dose d'eau dont aura besoin sa culture jusqu'à la prochaine main d'eau (afin d'éviter un stress hydrique pour sa culture). Le problème du producteur sera alors de maximiser le rendement net d'irrigation pour une dose nette recherchée. Le producteur aura également pour contrainte de ne pas dépasser un temps d'irrigation acceptable pour l'ensemble du groupe.

La deuxième tactique représente un producteur identique au premier, mais qui recherche également à ne pas limiter l'enracinement de sa culture. En effet, dans le premier cas, si les doses apportées sont faibles, la profondeur d'humectation sera faible. Les racines s'installant dans la zone humide, seront éventuellement limitées. En cas de défaut des autres membres du groupe (allongement de l'intervalle entre irrigations) le stress hydrique risque d'apparaître assez rapidement du fait du faible enracinement. La deuxième tactique consiste donc également à maximiser le rendement net d'irrigation, pour une dose voulue. Cependant le calcul de cette dose voulue intégrera le besoin de ne pas limiter l'enracinement des plantes.

Finalement, la troisième tactique, consiste à maximiser la dose nette d'irrigation. Elle est caractéristique des producteurs qui recherchent à capter le maximum d'eau dans sa parcelle durant le temps où ils possèdent la main d'eau. On comprend que cette technique amènera des pertes en eau, soit

par percolation profonde (le producteur ouvre beaucoup de raies pendant un temps relativement long), soit par pertes en colature. On essaiera cependant de justifier la présence de cette tactique dans les sections suivantes.

5.3.6 Efficience d'application d'une irrigation en fonction de l'état du milieu

Si l'on suppose que le producteur essaie d'appliquer une dose donnée quand il obtient la main d'eau. Compte tenu des contraintes d'irrigation à la raie, le producteur essaiera donc d'obtenir une dose nette (= dose infiltrée dans le dernier quart de la parcelle) la plus proche possible de la dose recherchée. Si l'on définit le rendement de l'irrigation, comme le ratio entre la dose nette appliquée et la dose voulue, on peut traduire le problème du producteur en une maximisation du rendement sous contrainte d'application minimum, et d'un temps d'irrigation maximum.

Nous pouvons donc intégrer le modèle de raie décrit ci-dessus avec un modèle de décision. Ce modèle de décision simple aura pour variables exogènes les données du milieu (B , C_{s0} , caractéristiques de la parcelle et des raies), et les membres droits des contraintes auxquelles doit faire face le producteur (dose recherchée, temps maximum d'irrigation) et pour variables endogènes (variables de décision du producteur) le couple débit-temps, qui optimise le rendement net ainsi défini. Ce modèle écrit en langage LINGO (LINDO Systems, 2001) est présenté en Annexe D.

La figure 5.3 montre l'évolution du rendement maximum que le producteur peut obtenir en fonction des conditions de fissuration du sol (B), pour deux doses recherchées de 60mm et 110 mm. Les courbes nous montrent qu'il est difficile d'obtenir un bon rendement d'irrigation quand on cherche à appliquer une faible dose sur un sol ayant un fort déficit hydrique (B important). De même, il est relativement difficile d'appliquer une dose importante sur un sol humide (B faible). Les variations sur le rendement net sont importantes puisque l'on a des efficacités allant de 40% à 90%.

Le rendement maximum varie fortement en fonction des conditions de milieu. On ne peut donc pas considérer, comme le font implicitement beaucoup d'études économiques, le rendement net d'irrigation comme une donnée ne dépendant que de la maîtrise technique du producteur.

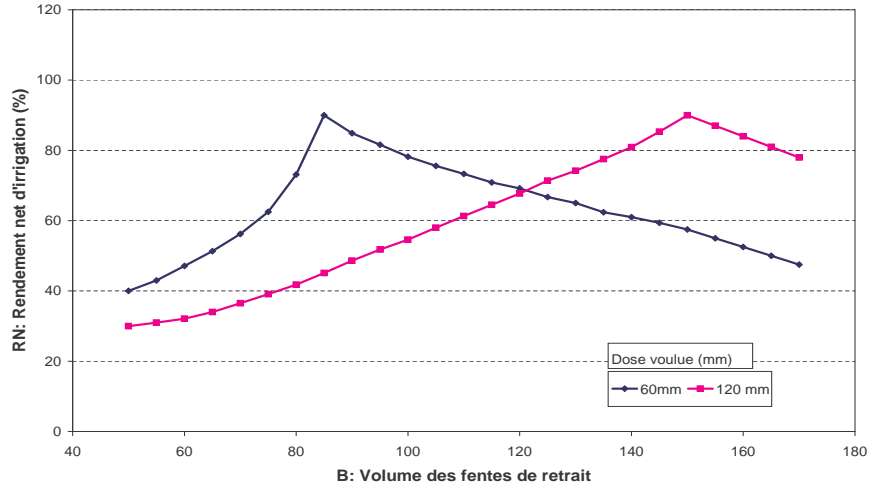


FIG. 5.3 – Evolution du rendement net maximum en fonction des conditions de la parcelle

Si l'on revient sur notre modèle économique simple utilisé lors de notre introduction, nous devons donc introduire une fonction $h(B, q)$ d'efficience d'irrigation, dont les paramètres sont B indicateur des conditions de milieu au moment de l'irrigation, et q la dose recherchée. Le revenu optimum du producteur est donc :

$$y = p \cdot f(h(B, q) \cdot q, i) - c_1(q) - c_2(i) \quad (5.7)$$

Il est difficile d'obtenir des relations analytiques simple pour ce problème d'optimisation, pour deux raisons :

- cela supposerait une estimation empirique de la relation $h(B, q)$
- il existe en fait des interactions entre les différents intrants, notamment entre la dose d'eau appliquée et le temps de travail.

Il nous reste donc à obtenir un nombre discret de stratégies d'irrigation, dont nous mesurerons l'impact sur les différents coefficients techniques : dose brute, dose nette, temps de travail et in-fine rendements. Vu la complexité des interactions entre les différentes variables nous avons développé un modèle de simulation intégrant trois composantes : un modèle de raie (qui représente

la fonction h de notre modèle analytique), un modèle de bilan hydrique (qui représente la fonction f de notre modèle analytique), et un modèle de décision spécifique à chaque tactique d'irrigation que le producteur pourra prendre.

5.4 Relations eau, rendement et sa variabilité, travail par un modèle intégré

Les figures 5.4 et 5.5 décrivent les interactions entre les trois modèles. La figure 5.4 est un diagramme des opérations effectuées successivement par les modèles de raie (et son pilotage au travers d'une tactique), et par les modèles de bilan hydrique, inspirée de la méthode d'analyse de programmation UML (Muller, 1997).

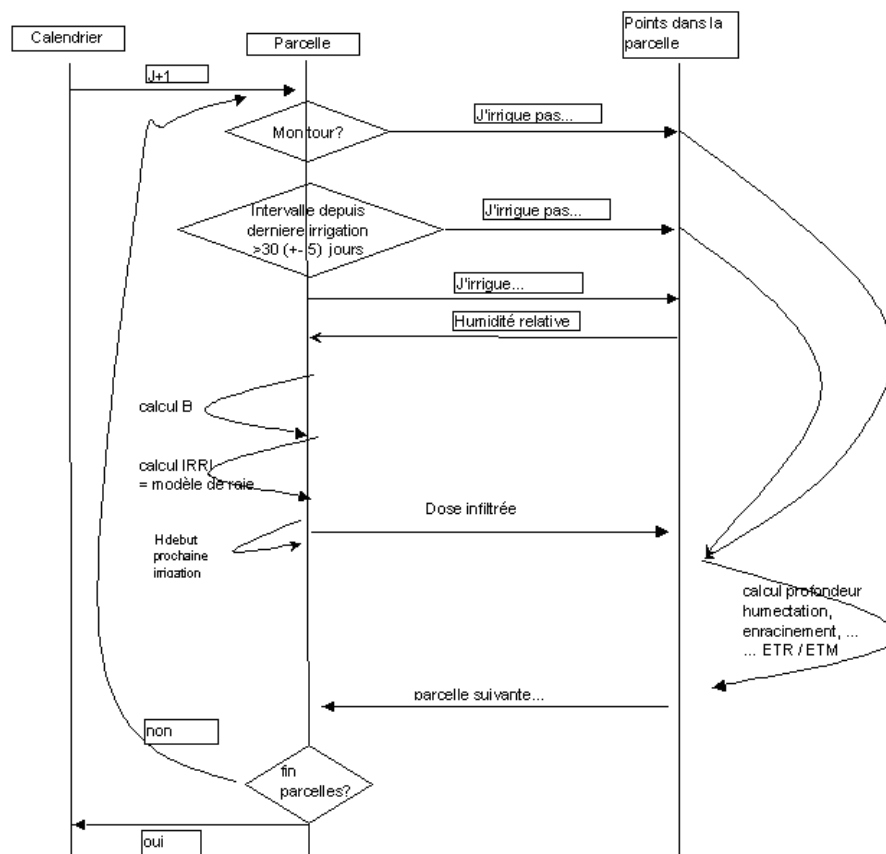


FIG. 5.4 – Diagramme UML du modèle intégré

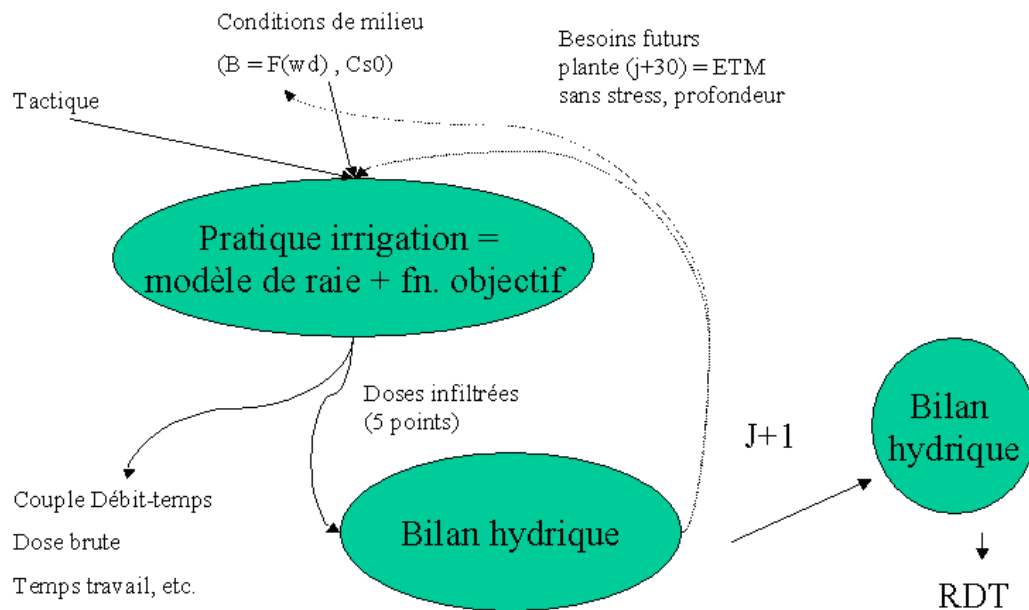


FIG. 5.5 – Représentation schématique des interactions entre les trois modèles

Les principales fonctions du bilan hydrique développées en Visual Basic®. Une base de donnée Access® a été également développée afin de permettre l'automatisation, et la gestion des données de simulations. Les modèles de pilotage des tactiques développés en LINGO® sont présentés en Annexe E.

5.5 Conclusions

Nous avons voulu dans ce texte expliquer la démarche d'élaboration des coefficients techniques qui alimenteront les modèles économiques des systèmes de production. Nous avons tenté de démontrer que l'utilisation d'un coefficient d'efficience net de l'irrigation est peu réaliste et avons introduit la notion de tactique d'irrigation.

Au-delà de leur simple utilisation comme générateurs de coefficients techniques, l'élaboration et l'intégration des différents modèles, aura servi d'outil de dialogue entre chercheurs aux disciplines éloignées et d'aide à la compréhension des problèmes de décision auxquels sont confrontés les producteurs. Ce modèle intermédiaire sera à considérer autant comme un modèle pour prédire qu'un « modèle pour poser des questions ».

Ayant avancé dans la compréhension des mécanismes de l'irrigation, et armé des différents coefficients techniques, nous pouvons maintenant la modélisation des systèmes de production. Ce sera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 6

Le modèle d'exploitation et l'équilibre coopératif

6.1 Introduction

Au cours des chapitres précédents nous avons décrit et caractérisé la diversité du fonctionnement des puits collectifs, ainsi que celle des producteurs la composant (Chapitre 3). Nous avons ensuite identifié les sources d'interactions stratégiques entre les producteurs (Chapitre 4) et, à l'aide de modèle purement biophysiques, analysé les différentes options techniques à la disposition des producteurs (Chapitre 5). Forts de ces différentes données, nous pouvons aborder maintenant l'étape de modélisation des puits collectifs. Celle-ci nous permettra de synthétiser, au sein d'un modèle unique, les différents éléments de connaissance accumulés jusqu'alors.

Pour ce faire nous devons procéder par étapes. Comme nous l'avons déjà abordé au chapitre 3, le système puits collectif est constitué de sous-systèmes (les systèmes de production) en interactions. Notre première étape sera donc de décrire le modèle d'exploitation. L'exercice consiste alors à isoler artificiellement notre système de production de son environnement, pour caractériser son comportement. L'environnement reste présent par le biais de variables exogènes (prix des denrées, comportement supposé des autres producteurs). Dans ce cadre, la première section sera consacrée à la description de la structure générale du modèle et à la justification des choix de modélisation au travers d'une revue rapide de la littérature sur les modèles d'exploitation.

Les sections suivantes seront consacrées à la description même du modèle d'exploitation : la section 6.4 s'attachera à décrire les contraintes de production, et la section 6.5 décrira les objectifs individuels des producteurs et les hypothèses faites sur leur mode de décision en univers risqué.

Une fois le modèle individuel décrit, nous aborderons le problème de l'agrégation des comportements individuels au sein du puits collectif. L'agrégation suppose de faire des hypothèses sur les comportements des producteurs en situation d'interactions stratégiques. Dans ce chapitre, nous traiterons essentiellement d'un mode de fonctionnement purement coopératif entre les membres : chaque membre agit pour l'intérêt commun, même s'il doit y perdre individuellement¹. Ce mode de fonctionnement sera contrasté par la suite à un mode de fonctionnement non-coopératif (Chapitre 7).

Finalement, nous terminerons ce chapitre par une description des données utilisées pour renseigner les modèles.

6.2 Structure du modèle d'exploitation

Dans cette section nous décrivons les choix opérés quant à la structure générale du modèle d'exploitation : hypothèses sur le processus de décision et la rationalité des producteurs et choix de structuration de la décision vis-à-vis du risque.

6.2.1 Le processus de décision

Dans les modèles économiques, les agents choisissent entre plusieurs alternatives après un processus de décision au cours duquel ils répondent à trois questions :

- Qu'est ce qui est faisable ?
- Qu'est ce qui est désirable ?
- Quelle est la meilleure alternative, étant donné le(s) critère(s) de désirabilité, et les contraintes de faisabilité ?

A la première question correspond une phase d'exploration de l'univers des possibles et des contraintes afférentes. La description d'un univers risqué

¹On pourrait envisager une répartition ultérieure par des transferts de revenus au sein du groupe, mais ceci a été considéré hors de notre question

comprend deux types d'information. D'une part, on a un inventaire exhaustif des événements possibles et de leurs conséquences. D'autre part, à chaque événement peut être associé une probabilité d'occurrence, objective ou subjective. Cette dernière information permet d'ailleurs de distinguer l'univers risqué de l'univers incertain (Knight, 1921).

La deuxième question permet de définir l(es) objectif(s) de l'agent. On suppose implicitement que l'agent possède une fonction de préférence sur les conséquences des différents événements. Cette fonction est supposée complète (on peut toujours comparer deux résultats), transitive et continue.

La troisième question découle naturellement de l'hypothèse de rationalité des agents que l'on cherche à modéliser.

Les modèles de programmation mathématique permettent de reproduire ce processus puisque l'on représente les décisions des agents comme la maximisation d'une fonction d'utilité sous contraintes. Cependant, l'environnement de production étant risqué, on doit prendre en compte l'influence de ce risque sur les décisions des agents (Boussard, 1997).

6.2.2 Structuration de la décision par rapport au risque

On peut distinguer deux types de modélisation en fonction des hypothèses faites sur l'interaction entre risque et prise de décision.

Dans le premier cas, le décideur prend toutes ses décisions avant que l'incertitude ne soit révélée. Dans le deuxième cas, la prise de décision est prise par étapes successives et les états de nature sont révélés progressivement (à chaque étape) au producteur. Par exemple, dans le cas d'une répartition des décisions entre deux stades, le producteur prend d'abord un premier ensemble de décision au début de l'année (stade 1), et attend la révélation de l'état de nature durant le stade 1 avant de prendre un deuxième ensemble de décision (stade 2). Pour les décisions du stade 2, subsiste l'incertitude quant aux états de nature du stade 2. Ce deuxième type de modèle utilise la programmation stochastique discrète (Rae, 1971 ; Aplan et Hauer, 1993). Celle-ci permet également la représentation des problèmes où il existe une incertitude sur la disponibilité en ressources. Cependant, les modèles sont relativement lourds à mettre en place, dès que le nombre de stade/état de nature est important.

Nous avons opté pour un modèle où les producteurs prennent leur décision en début d'année et pour tout le cycle de production, et ce pour deux raisons principales. Premièrement, le point central de cette étude se focalisant sur les interactions stratégiques entre les producteurs, nous avons préféré garder une représentation de leur décision relativement simple. Deuxièmement, la programmation stochastique discrète prend tout son sens quand il y a interactions entre les différents stades, i.e. les résultats du cycle 1 influenceront les décisions prises pour le cycle 2. Sans décréter que ces interactions n'existent pas, nous avons considéré qu'elles étaient faibles en comparaison avec les autres forces en action.

Deux sources d'incertitudes sont traitées dans ce modèle. La première tient à l'incertitude sur les rendements et la deuxième provient de l'incertitude sur les prix des produits. Nous avons donc considéré comme connu au moment de la décision, les prix des intrants agricoles, et qu'il n'existe pas de risques sur les quantités d'eau disponibles au début du cycle. Ce qui, pour les puits agricoles est assez proche de la réalité².

6.2.3 La prise en compte du risque dans la décision

Ayant choisi un modèle stochastique, il nous reste à faire des hypothèses sur l'influence du risque sur le processus de décision. Une revue rapide de la littérature nous permettra de situer nos choix.

La littérature sur la modélisation de la décision en univers risqué est abondante. Notre but n'est pas ici de la reprendre de manière exhaustive. Il existe d'ailleurs diverses revues de littérature sur le sujet (voir entre autres, Hardaker *et al.*, 1991 ; Buschena et Zilberman, 1994 ; et plus modestement Jourdain, 1999). Schématiquement, on peut classer cette littérature en trois grands paradigmes : (a) les modèles reposant sur la maximisation d'une fonction d'utilité, (b) les modèles avec contraintes de sécurité et (c) les modèles émanant de la théorie des jeux dans lesquels la nature agit comme un des joueurs. Nous n'aborderons ici que les modèles de maximisation d'une fonction d'utilité et les modèles avec contraintes de sécurité, car les modèles émanant de la théorie des jeux se placent dans un univers incertain.

²Contrairement aux producteurs basant leur production agricole sur les eaux de surface, ceux utilisant les eaux profondes ne mentionnent pas de problèmes majeurs sur la variabilité des volumes disponibles

6.2.3.1 Maximisation d'une fonction d'utilité

La plupart des modèles d'exploitation intégrant les risques de production reposent sur la théorie de l'utilité espérée. On utilise l'idée que, pour le décideur, la meilleure solution à un problème est celle qui maximise l'espérance mathématique de son utilité (von Neumann et Morgenstern, 1944).

On sait, depuis Allais (1953), que le paradigme de l'utilité espérée souffre de problèmes empiriques dans les cas extrêmes. Il a ainsi montré que, lorsque les gains ou les pertes étaient importants, et la perte était quasi-sure ou pratiquement négligeable, les agents ont un comportement contradictoire avec la théorie de l'utilité espérée. Des développements nouveaux, notamment avec le modèle d'utilité anticipée (Quiggin, 1982 ; Wakker, 1994 ; Gayant, 1995) qui propose de séparer les déformations de probabilité et la forme de la fonction d'utilité dans leur impact sur le risque, présentent des propriétés théoriques intéressantes. Cependant, on trouve peu d'études appliquées, Bouzit (1995) faisant figure d'exception. Cela est sûrement lié aux problèmes d'estimations conjointes de la fonction d'utilité et de la fonction de déformation des probabilités. Par ailleurs, la théorie de l'utilité espérée reste largement valable en première approximation dans beaucoup de décisions courantes. On se focalisera donc ici sur les modèles reposant sur l'hypothèse d'utilité espérée.

Dans ce cadre, le modèle E-V ou *espérance-variance* est couramment utilisé. Dans ce cas, la maximisation de l'utilité espérée est supposée équivalente à la maximisation d'une combinaison linéaire des deux premiers moments de la distribution de la richesse du producteur $U(\tilde{Z}) = E(\tilde{Z}) - A \cdot \sigma_Z^2$. Cette formulation repose sur l'approximation de Arrow-Pratt (Pratt, 1964 ; Arrow, 1971) valable par définition quand \tilde{Z} est petit par rapport à la fortune W du décideur. Cette formule résulte du développement en série de Taylor à l'ordre 2 au voisinage de W des deux membres de l'égalité : $E(U(W + \tilde{Z})) = U(W + E(\tilde{Z}) - \Pi)$ où $\Pi = A \cdot \sigma_Z^2$ est la *prime de risque* et $A = \frac{-U''(W)}{U'(W)}$ est l'aversion au risque du décideur (Boussard, 1997). La prime de risque est la somme que l'on est disposé à payer pour obtenir avec certitude le revenu $E(\tilde{Z}) - \Pi$ à la place du revenu aléatoire \tilde{Z} . Les applications les plus connues sont la programmation quadratique (Markowitz, 1952 ; Freund, 1956) et son approximation linéaire le modèle MOTAD (Hazell, 1971).

Baumol (1963) montre que l'ensemble des solutions E-V contient un cer-

tain nombre de solutions dominées selon le critère de dominance stochastique de second degré. Il propose donc le critère de la limite inférieure de confiance ($E - k.\sigma$) où k est le coefficient d'aversion au risque du décideur.

Plus récemment, s'inspirant de ces différentes méthodes, Donaldson *et al.* (1995) ont utilisé une fonction d'utilité du type $E(U(\tilde{z})) = E(\tilde{z}) - \phi \cdot \lambda$ où \tilde{z} représente le revenu aléatoire du producteur, et λ la somme des déviations négatives par rapport à la moyenne de ce revenu. Le coefficient ϕ utilisé pour calibrer le modèle peut alors être interprété comme le coefficient de substitution entre revenu moyen et la somme des déviations négatives par rapport au revenu moyen.

Du fait de leur relative simplicité et de leur robustesse, les modèles découlant des modèles E-V sont largement utilisés dans les études empiriques. Cependant, les hypothèses sur lesquelles ces modèles se basent sont parfois difficiles à tenir et ont été souvent remises en cause. En effet, on doit supposer au moins l'une de ces hypothèses :

- Une fonction d'utilité quadratique ;
- Une distribution normale de la richesse du décideur ;
- Une situation où le risque encouru est faible en comparaison avec la richesse du décideur ;
- Une symétrie d'impact entre des résultats positifs et des résultats négatifs ;

La fonction d'utilité quadratique crée deux problèmes. Premièrement elle n'est définie que sur un intervalle fermé de niveau de richesse du décideur, car au-delà d'un certain niveau de richesse elle devient décroissante. De plus, elle implique une aversion absolue au risque du décideur croissante avec le niveau de richesse, ce qui n'est pas compatible avec les observations empiriques (Arrow, 1971).

La symétrie implicite de la distribution normale a été critiquée (Hanoch et Levy, 1969 ; Levy et Hanoch, 1970).

La faiblesse du risque par rapport à la richesse initiale du décideur est parfois difficile à soutenir, surtout dans le domaine de l'agriculture des pays en développement.

Finalement, on trouve également des réserves quant à l'utilisation de la variance comme indicateur des effets négatifs sur l'utilité du décideur. Markowitz (1952) suggère l'utilisation de la semi-variance, mais utilise la variance

pour des raisons essentiellement pratiques. Porter (1974) explore les relations entre la semi-variance et la dominance stochastique. Il montre tout d'abord que l'utilisation de la semi-variance crée des ensembles de solutions plus proches de l'ensemble des solutions efficientes. Il montre enfin qu'en utilisant la semi-variance autour d'un point fixe (et non plus autour de la moyenne) on obtient un sous-ensemble des solutions dominantes au terme de la dominance stochastique du deuxième degré. Cela ouvrira la voie à des modèles du type target-MOTAD (cf.infra).

Plus récemment, la méthode UEP (« Utility Efficient Programming ») propose l'utilisation de fonctions d'utilité moins contraignantes et compatibles avec les hypothèses classiques de comportement du décideur (Lambert et McCarl, 1985; Patten *et al.*, 1988), notamment pour l'évolution de la prime de risque avec le niveau de revenu. Cette approche est également permise grâce à la disponibilité croissante d'algorithmes de résolutions des problèmes de maximisation non-linéaires.

Par ailleurs, Yitzhaki (1982) ouvre la voie à l'utilisation du coefficient de Gini pour l'obtention de solutions non dominées (Buccola et Subaei, 1984; Okunev et Dillon, 1988; Shalit, 1995).

Ces deux dernières techniques (UEP et moyenne-Gini), par une paramétrisation adéquate, permettent d'ailleurs de réconcilier les méthodes d'efficacité stochastique et de maximisation d'une fonction d'utilité (Yitzhaki, 1982; Lien et Hardaker, 2001).

6.2.3.2 Les modèles de type « safety-first »

« A valid objection to much economic theory is that it is set against a background of ease and safety. To dispel this artificial sense of security, theory should take account of the often close resemblance between economic life and navigation in poorly charted waters or maneuvers in a hostile jungle. Decisions taken in practice are less concerned with whether a little more of this or of that will yield the largest net increase in satisfaction than with avoiding known rocks of uncertain position or with deploying forces so that, if there is an ambush round the next corner, total disaster is avoided. If economic survival is always taken for granted, the rules of behaviour applicable in an uncertain and ruthless world cannot be discovered. »

(Roy, 1952, p. 432)

Contrairement aux modèles précédents, les modèles de type « safety-first » reposent sur l'idée que le décideur cherche, d'abord et avant tout, à éviter les situations catastrophiques : banqueroute, famine, etc.

Ceci s'exprime généralement sous la forme d'une contrainte sur la distribution de probabilité des revenus : $Prob(Y \leq Y_0) \leq \beta$ où Y_0 est le revenu plancher, et β la tolérance vis-à-vis du risque que le revenu soit inférieur au revenu plancher.

De nombreuses variantes existent. Roy (1952) cherche à minimiser la probabilité β . Telser (1955) décompose la décision en deux temps : élimination des alternatives ne permettant pas d'obtenir le revenu minimum requis avec une probabilité β , puis sélection de l'alternative qui maximise le revenu. Kataoka (1963) propose de maximiser le revenu minimum Y_0 pour une probabilité β fixée.

Plus récemment, Tauer (1983), avec le modèle *target MOTAD*, linéarise le problème en fixant une valeur maximale aux déviations négatives par rapport au revenu plancher Y_0 . Atwood (1985) suggère une généralisation par l'utilisation des moments partiels pour l'estimation des probabilités. Finalement, Berbel développe une méthode multi-objectif découlant des travaux de Tauer et de Atwood, qui permet d'évaluer les jeux de compromis entre maximisation du revenu, et probabilité de ne pas atteindre le revenu plancher (Berbel, 1988 ; Berbel, 1989 ; Berbel, 1993).

La méthode la plus couramment utilisée dans les études récentes est le *target MOTAD*. Le plus grand reproche fait à la méthode *target MOTAD* est de demander deux variables exogènes pour caractériser l'attitude du décideur par rapport au risque.

6.2.3.3 Conclusion : choix de représentation du risque

La révision rapide de la littérature sur la décision en univers risqué nous montre que, dans le cadre d'une optimisation d'une fonction d'utilité, la technique UEP possède des avantages certains sur ses prédécesseurs. En effet, parmi le large éventail des fonction d'utilité, on trouve un certain nombre de fonction d'utilité ayant des caractéristiques requises (propriété DARA,

CARA..). Cependant, ces fonctions relèvent plus souvent de la convenance mathématique que d'une représentativité comportementale.

Par ailleurs, la méthode présente l'inconvénient d'introduire des fonctions non-linéaires dans le modèle. Vu la disponibilité sur le marché des solvers d'un grand nombre d'algorithmes de résolution des problèmes non linéaires, la non-linéarité des modèles n'est certes plus un obstacle insurmontable. Dans notre cas, cependant, du fait des interactions stratégiques, le modèle possède déjà des caractéristiques non-linéaires³. Après quelques essais, nous avons constaté que l'ajout d'une fonction d'utilité non-linéaire rendait les résultats des modèles moins robustes (plus sensibles aux conditions initiales).

Le risque n'étant introduit dans le modèle que pour approcher le comportement des producteurs, et n'étant pas notre question principale, nous avons finalement opté pour la méthode proposée par Donaldson *et al.* (1995).

Par ailleurs, par le biais des contraintes de trésorerie, nous avons imposé de manière exogène des contraintes de sécurité (contrainte de trésorerie positive).

6.2.4 Fortune ou revenus transitoires ?

La notion d'aversion au risque est bâtie sur des hypothèses de comportement vis à vis des aléas sur la richesse globale du décideur. Cependant, les données que l'on gère sont des données de transition de revenu : les pertes ou les gains annuels par production : marges brutes par hectare, salaires, etc.

On passe de l'un à l'autre par une équation simple : $\widetilde{W} = W_0 + \widetilde{X}$ où W_0 représente la richesse initiale du décideur, et \widetilde{X} représente la perte ou le gain annuel. On fait l'hypothèse ici que le décideur fera le même choix qu'il soit confronté à un problème en termes de richesse ou en termes de gains/pertes (hypothèse d'intégration des revenus).

Si le producteur est décrit par une fonction d'utilité $U(\widetilde{W})$, on définit le coefficient d'aversion absolue au risque du producteur comme $r_a(\widetilde{W}) = -\frac{U''(\widetilde{W})}{U'(\widetilde{W})}$. Ce coefficient présente l'avantage de ne pas varier avec une transformation linéaire de la fonction d'utilité (Pratt, 1964 ; Arrow, 1971). Il est donc

³Du fait de la répartition des coûts d'extraction au prorata des superficies, les choix techniques de chacun des producteurs influencent le coût unitaire de l'eau, rendant le problème non-linéaire. Ceci sera amplement détaillé dans les chapitres ultérieurs

inchangé si on ajoute une constante à tous les résultats annuels potentiels, on aura donc $r_a(\widetilde{W}) = r_a(\widetilde{X})$.

Dans la littérature, il est accepté que l'aversion absolue est décroissante avec la fortune (propriété DARA). Cependant l'aversion absolue présente le désavantage d'être mesurée en unités monétaires. Le coefficient d'aversion relatif est un nombre pur. Cependant, l'évolution du coefficient d'aversion relatif avec la fortune du décideur est ambiguë. Arrow (1971) argumente que l'aversion relative se situe autour de 1 et est une fonction croissante avec la fortune. A l'opposé, Hamal et Anderson (1982) pensent que l'aversion relative peut atteindre des chiffres de l'ordre de 4. Un tel désaccord semble indiquer que l'aversion relative est relativement constante (Hardaker, 2000). Une aversion relative constante implique que les préférences du décideur sont inchangées si l'on multiplie tous les résultats par une constante positive. Ce que l'on pourra utiliser : $r_R(\widetilde{X}) = X \cdot r_A(\widetilde{X}) = X \cdot r_A(\widetilde{W}) = \frac{X}{W} \cdot r_R(\widetilde{W})$

Même s'il y a équivalence entre les deux approches, le coefficient d'aversion relative devra intégrer la richesse du producteur W , et les gains/pertes annuelles potentielles \widetilde{X} (Hardaker, 2000 ; Anderson et Hardaker, 2002). Le coefficient $\frac{X}{W}$ peut alors être interprété comme la part de la richesse « remise en jeu » lors de l'exercice annuel.

6.3 Les éléments de base du modèle d'exploitation

Avant de rentrer dans la description du modèle d'exploitation lui-même, nous décrivons les principaux éléments constitutifs du modèle. Cela nous permet également d'introduire les notations qui seront utilisées dans le reste du document.

6.3.1 Les zones (z)

Le producteur dispose de parcelles aux caractéristiques contrastées en fonction du type d'accès à l'eau. Nous ferons la distinction entre les parcelles au régime pluvial, c'est à dire sans accès à de l'eau d'irrigation où le producteur dépend alors complètement des aléas climatiques, et les parcelles ayant

accès à de l'eau provenant d'un puits profond, le puits étant géré de manière collective.

La gestion collective du puits impose certaines contraintes organisationnelles. Le groupe décide de manière autonome des périodes d'irrigation, mais un système de tour d'eau est généralement en place, ce qui limite la fréquence des irrigations.

6.3.2 Les cultures (c)

Les agriculteurs enchaînent de une à trois cultures par an. En fonction de la zone considérée, le rythme de production est sensiblement différent. Pour les parcelles au régime pluvial, les cultures sont permises seulement durant la saison des pluies (juin-novembre). En effet, la pluviométrie durant l'hiver est vraiment trop basse pour permettre la mise en culture.

Pour les zones irriguées par le puits, il n'existe pas d'incertitudes sur l'approvisionnement d'eau quel que soit le cycle. La quantité d'eau disponible pour le cycle est connue du groupe au moment de la prise de décision sur les cultures. Les cultures principalement rencontrées dans les zones irriguées sont les céréales (blé, orge, sorgho, maïs), mais certains producteurs enchaînent trois cultures par an sur une partie de leur exploitation. Les producteurs pratiquant trois cycles de cultures sont ceux qui cultivent des cultures maraîchères.

Les activités seront entendues ici comme des systèmes de cultures, c'est à dire « une succession de cultures + un itinéraire technique ». Ainsi, nous avons décliné certaines cultures selon différents itinéraires techniques, représentant ainsi différentes fonctions de production. Notamment, pour les céréales, nous avons étudié des variations lors de la préparation du sol (semis direct ou non). Nous avons également inclus des variations en fonction des options d'irrigations prises. Les options d'irrigation à la disposition des producteurs sont, (a) une pratique visant une maximisation du rendement agro-hydraulique de l'eau en apportant les besoins en eau de la plante pour l'intervalles entre les irrigations (sorte de pilotage par l'ETR), (b) la même stratégie mais en acceptant un certain stress hydrique (pilotage à 80% de l'ETR), (c) une maximisation de la dose nette apportée à la parcelle (voir chapitre 5)

Par ailleurs, nous avons considéré les activités comme des combinaisons d'une culture d'hiver avec une culture d'été. Pour éviter d'alourdir le modèle, nous avons pris l'hypothèse que le producteur faisait un choix au début de la campagne d'hiver pour toute l'année. Nous avons donc choisi délibérément de ne pas développer un modèle stochastique discret (cf. supra). Nous avons décliné les combinaisons de cultures d'hiver et d'été. L'ensemble de ces combinaisons est constitué de 420 activités composites (Annexe F).

6.3.3 Le ménage et sa composition

La composition du ménage, et son influence sur la disponibilité de la force de travail, constitue un facteur de différenciation entre les ménages. Le modèle prend donc en compte de manière explicite la composition du ménage. Chaque membre du ménage y est donc décrit en terme d'offre de travail, de coût d'opportunité de sa force de travail et de sa participation aux activités agricoles ou à la migration.

On distingue également les personnes qui ont un savoir-faire en matière d'irrigation à la raie ($DFIrr$), de ceux qui ne l'ont pas (DF).

6.3.4 Les états de nature

La représentation de la prise en compte du risque par le décideur passe par la définition de l'ensemble des états de nature envisageables. Nous avons choisi de limiter les risques de production aux rendements et aux prix des produits. Ce qui veut dire que nous n'avons pas introduit d'incertitudes ni sur la disponibilité des ressources, ni sur les coefficients techniques.

Pour prendre en compte correctement les interactions entre les risques prix et les risques sur les rendements, nous avons travaillé avec 10 états de nature. Ce choix résulte d'un compromis entre une représentation détaillée des états de nature, et la « maniabilité » du modèle.

6.4 Les contraintes

Le producteur est limité dans ses choix par un certain nombre de contraintes. Nous avons représenté ici trois types de contraintes.

Premièrement, les contraintes techniques représentent l'existence de limites dans l'utilisation des ressources, l'existence de produits intermédiaires et les impératifs contractuels. Les contraintes techniques délimitent l'ensemble des possibilités de production et fournit des liens entre les variables. Pour bien représenter les contraintes de disponibilité des ressources, nous avons procédé à un découpage de l'année en périodes.

Deuxièmement, les contraintes institutionnelles reflètent les règles externes qui sont imposées sur le producteur comme, par exemple, les limites sur le crédit.

Finalement, les contraintes subjectives sont introduites pour représenter les contraintes supplémentaires qui représenteront l'attitude du producteur : contraintes liées au risque, disposition à encadrer le travail salarié, etc.

Les ressources utilisées dans notre modèle sont ici la terre, l'eau et le travail, ainsi que divers intrants extérieurs. Vu l'importance de la migration dans la région, nous avons souligné dans notre présentation les contraintes liées à la migration qui regroupent les contraintes de travail, les contraintes financières et la gestion du risque.

6.4.1 Les contraintes de terre

Dans chaque zone z , le producteur possède une quantité de terre déterminée. Parmi les activités répertoriées, on distingue les activités pour lesquelles l'eau d'irrigation n'est pas nécessaire de celles pour lesquelles celle-ci est nécessaire. Les premières peuvent être installées dans les deux zones (irrigables et non irrigables), alors que les deuxièmes sont limitées à la zone irrigable. Pour plus de commodité dans l'écriture du modèle par la suite, nous avons décrit les deux ensembles de cultures dans chacune des zones.

Pour la zone irrigable, et pour chacun des producteurs, nous aurons donc la contrainte :

$$\sum_{ai} X_{f,ai} \leq airei(f) \quad (6.1)$$

où $X_{f,ai}$ est la superficie de la culture ai cultivée par l'exploitation f dans la zone irriguée (les cultures ai sont irriguées ou non) (Variable endogène exprimée en ha).

Pour la zone non-irrigable nous aurons la contrainte :

$$\sum_{nai} Y_{f,nai} \leq aireni(f) \quad (6.2)$$

où $Y_{f,nai}$ est la superficie de la culture nai cultivée par l'exploitation f dans la zone non-irrigable (variable endogène exprimée en ha). Les cultures nai sont non-irriguées.

Pour les puits où existent des contraintes sur les superficies irrigables provenant de règles collectives, elles seront exprimées de manière *ad hoc*, selon qu'il s'agit de restriction égalitaire ou proportionnelle aux superficies existantes.

Dans ce modèle, nous ne considérerons pas la possibilité d'achats ou de ventes de terrain, car répondant à une logique patrimoniale hors du champ de notre étude. De même, nous n'avons pas considéré les transferts de terre par le marché de la location.

6.4.2 L'irrigation et ses contraintes

L'utilisation de l'eau d'irrigation apporte des contraintes de plusieurs natures. Premièrement, il existe des limites physiques à l'extraction ou à l'obtention de la ressource. Ainsi, les concessions d'extraction pour les puits profonds comporte une limite proportionnelle au nombre d'hectares irrigués. De même, le pompage des eaux profondes est un processus relativement lent. Il existe donc une limite physique d'extraction journalière. Finalement, des contraintes d'organisation peuvent apparaître dans les groupes.

6.4.2.1 Les contraintes de disponibilité en eau

Deux contraintes de natures différentes sont identifiées ici : la première est une limite administrative annuelle d'extraction, la deuxième correspond à la limite d'extraction du puits⁴. La mise en place d'une politique de quota d'électricité impliquerait une réduction du temps de pompage. Il est donc important de représenter correctement cette dernière contrainte.

⁴on ne peut pas pomper plus de 24 heures par jour !

Le quota d'extraction annuel des puits profonds La concession de forage d'un puits spécifie contractuellement un volume annuel maximum d'extraction. Celui-ci est calculé en fonction du nombre d'hectares déclarés pour ce puits. Cependant, les producteurs n'y portent qu'une attention limitée. Il est symptomatique qu'un grand nombre de producteurs ne connaissent pas (ou ne veulent pas connaître !) leurs consommations en volume ou n'ont tout simplement pas installé de compteurs volumétriques sur leur équipement de pompage. De fait, la probabilité d'un contrôle est très faible (3 inspecteurs pour 14.000 puits agricoles en 2000), et les moyens de contourner ses conséquences sont nombreux. Le système de la « *mordida* », c'est à dire le paiement d'une somme d'argent directement au contrôleur constatant une infraction, est largement établi dans tous les secteurs de la société mexicaine. Le contexte actuel ne stimule donc pas un comportement de respect des règles établies, nous n'intégrerons donc pas cette contrainte.

La contrainte d'extraction Une contrainte beaucoup plus concrète est la contrainte d'extraction. Durant les périodes critiques d'irrigation le puits fonctionne continuellement. Si on prend l'exemple d'un puits dont le débit est de 30 l/s. Si l'on considère une efficience de conduction de l'ordre de 90%, la quantité maximale quotidienne apportée à la parcelle sera de 2,332 m³. Si les producteurs apportent une lame brute d'eau de 25 cm à chaque irrigation (soit 2.500 m³/ha), ils irrigueront au maximum 0,93 ha par jour. Cette contrainte joue tant au niveau individuel qu'au niveau collectif, mais avec des influences différentes.

Pour certains groupes, quand le puits est relativement bien dimensionné par rapport à la demande, cette contrainte n'est pas vraiment active. Le temps d'irrigation de chacun des membres n'est pas limité explicitement. Par contre, avec l'augmentation de la profondeur de la nappe et l'âge des équipements certains puits voient leur débit se réduire progressivement. Il est intéressant d'observer les adaptations des règles à cette nouvelle contrainte. Premièrement pour pouvoir la décrire, deuxièmement pour pouvoir simuler la réaction des producteurs à une éventuelle limitation de la consommation. Par ailleurs, l'absence de règle explicites sur les temps d'irrigation de chacun des producteurs ne veut pas dire qu'il n'existe pas de norme non-écrite de temps acceptable d'irrigation.

Considérons tout d'abord la contrainte globale de tour d'eau. Les producteurs décident d'une longueur du tour d'eau acceptable pour l'ensemble du groupe.

$$\sum_{f,ai} X_{f,ai} \cdot eau_{ai,t} \leq debitPuits \cdot Long_t \quad (6.3)$$

où $eau_{ai,t}$, est la consommation en eau du système de culture ai durant la période t , $debitPuits$ est le débit du puits, et $Long_t$ est la longueur du tour d'eau pour la période t considérée.

Cette contrainte est une contrainte qui s'applique à l'ensemble des producteurs du puits. La valeur du paramètre exogène $Long_t$ donne une idée du sérieux avec lequel le groupe prend la contrainte globale du tour d'eau. Une valeur proche des valeurs choisies par le groupe montrera que les producteurs respectent la règle du tour d'eau de manière stricte. Si cette valeur s'écarte des valeurs choisies, cela montrera que les producteurs peuvent éventuellement dépasser les limites de tour d'eau au dépens des autres. Dans ce cas, les rendements des producteurs deviennent plus aléatoires (cf. chapitre 5).

Certains groupes décident de transformer cette contrainte volumétrique, en une contrainte individuelle de superficie irrigable. Pour être efficace, cette superficie irrigable est calculée pour pouvoir assurer un tour d'eau raisonnable pour tous (assurer une irrigation tous les 30 jours dans toutes les parcelles durant les périodes critiques du cycle d'hiver). On répartit alors le nombre d'hectares irrigables entre les membres, soit par une réduction proportionnelle aux hectares cultivés par chacun des producteurs, soit en attribuant une quantité égale à chacun des membres (maximum x ha pour chacun des membres).

Ces contraintes seront exprimées directement dans le modèle en faisant varier la superficie irrigable de chacune des exploitations. Elles ne nécessitent donc pas de contraintes spécifiques.

D'autres groupes ne transforment pas les volumes en superficies et établissent des contraintes individuelles de temps d'irrigation (donc de volume). Chaque producteur dispose alors d'un temps maximum pour son irrigation. L'allocation du temps d'irrigation correspond soit à une répartition égalitaire indépendante des surfaces cultivées ($tempsMax_t$, en heures), soit est fonction de la surface cultivée ($tempsMaxHa_t$, en heures d'irrigation par ha cultivé).

Dans le premier cas, le producteur doit cultiver son terrain pour disposer

de l'eau d'irrigation.

$$\sum_{ai} (X_{f,ai} \cdot eau_{ai,t}) \leq debitPuits \cdot tempsMax_t \quad (6.4)$$

Dans le deuxième, il pourra décider du nombre d'hectares qu'il décide d'implanter.

$$\sum_{ai} (X_{f,ai} \cdot eau_{ai,t}) \leq \sum_{ai} (X_{f,ai}) \cdot debitPuits \cdot tempsMaxHa_t \quad (6.5)$$

Cette dernière option laisse plus de flexibilité au producteur, et semble a priori permettre une meilleure valorisation de l'eau par ceux qui le peuvent.

6.4.2.2 Les contraintes d'organisation : tour d'eau

La gestion collective des puits impose certaines contraintes d'organisation. Le groupe organise les tours d'eau. Les producteurs irriguent dans un ordre pré-déterminé, et avec une fréquence plus ou moins établie (en général, les tours d'eau varient entre 30 et 40 jours selon la taille du groupe et la période de l'année). Il est donc difficile d'introduire des cultures dont les besoins en eau impliquerait une fréquence d'irrigation supérieure à celle établie par le groupe. Le cas le plus parlant est celui du brocoli. Le système racinaire du brocoli est relativement peu profond. Dans les conditions du Bajío, le brocoli nécessite donc un rythme d'irrigation accéléré (une irrigation tous les 15 jours). Il est techniquement difficile de gérer deux tours d'eau parallèles, l'un pour les céréales et l'autre pour les cultures horticoles au niveau d'un seul puits collectif. Ce qui en termes d'économie d'eau est dommageable puisque in fine les cultures horticoles consomment autant/moins d'eau qu'une céréale traditionnelle et produisent une valeur ajoutée en moyenne bien supérieure.

Nous avons introduit des contraintes spécifiques d'irrigation pour les cultures horticoles qui ont la même formulation que pour l'ensemble des cultures, mais qui sont appliquées aux cultures horticoles.

Egalement, les cultures fourragères, notamment la luzerne, sont difficilement acceptées au sein des puits collectifs. Cependant, certains puits semblent avoir trouvé la flexibilité nécessaire pour permettre la mise en place de la luzerne. Nous verrons que nous avons fait un cas particulier pour ces puits.

6.4.3 Les contraintes interagissant avec la migration

6.4.3.1 L'impact de la migration sur les systèmes de production

La migration revêt une importance particulière dans l'Etat du Guanajuato. Le Guanajuato est le premier état « exportateur d'émigrants » de la République mexicaine (Consejo Nacional de Población, 1998 ; Consejo Nacional de Población, 2000). Il est classique, au sein des ménages agricoles, qu'une partie des membres de la famille émigre aux Etats-Unis alors qu'un nombre restreint de familiaux restent sur l'exploitation.

Trois stratégies distinctes ont été rencontrées :

- *Emigration permanente d'une partie du ménage*. Il s'agit alors de membres de la famille ayant recréé une cellule familiale complète aux Etats Unis. Ceux-ci n'ont pas vraiment l'intention de revenir un jour travailler sur l'exploitation familiale. En général, ils envoient une quantité régulière d'argent aux parents restés au Mexique. Parfois même, ils envoient des quantités importantes d'argent pour des besoins ponctuels du ménage. L'argent de la migration sert donc à des besoins directs de consommation, et/ou à se substituer au manque de crédit dont pâtissent les ejidatarios et les petits propriétaires ayant de faibles surfaces : achats de biens de consommation intermédiaire, engrais en début de cycle par exemple. L'argent de la migration n'est donc réinvesti que marginalement dans l'agriculture (biens de consommations intermédiaires et non bien durables).
- *Emigration permanente de l'ensemble du ménage*. Le ménage, en général, ne vend alors pas la terre (pour se garder la possibilité éventuelle de retour), mais la loue à des proches (voisins ou famille élargie). L'argent de l'émigration ne retourne pas à un usage agricole.
- *Emigration temporaire d'une partie du ménage* (pour quelques années, ou quelques mois dans l'année avec retour annuel au Mexique). La cellule familiale du migrant est alors au Mexique, et l'argent de la migration est souvent réinvesti dans l'agriculture (achat d'équipements durables, achat de terre).

Les statistiques nationales semblent indiquer une tendance croissante du premier type de migration (Consejo Nacional de Población, 2000).

Pour notre modèle, il est important de prendre en considération l'impact

de la migration car la pénurie de main d'œuvre régionale assez marquée : ne restent que les vieux et les filles(!). Les jeunes préfèrent (doivent) partir vers les Etats-Unis. Le coût d'opportunité du travail est donc assez élevé, amenant les producteurs restants à chercher des solutions employant moins de main d'œuvre, et créant des problèmes pour certains producteurs. Par ailleurs, il est important de quantifier les revenus extra-agricoles de la famille élargie qui envoie de l'argent depuis les Etats-Unis, notamment pour les contraintes financières et alimentaires. Enfin, la possibilité d'une émigration aux Etats-Unis aura une certaine influence sur la prise de risque des producteurs.

Chacun de ces aspects est décrit dans les sections suivantes.

6.4.3.2 Les contraintes de travail

Pour chaque période t , les besoins en travail des cultures ne peuvent excéder la capacité de travail du ménage (main d'œuvre familiale + journaliers).

La plupart des opérations culturales sont mécanisées. Quand le producteur ne dispose pas des équipements adéquats, il existe un marché actif de location de l'équipement agricole et du travail à façon dans la région, de telle manière que les besoins en travaux sont relativement limités.

Par contre, le travail d'irrigation à la raie nécessite une quantité importante de travail spécialisé pour obtenir une efficacité d'application correcte (surveillance, travail dans les raies, et calculs de l'irrigation)

Beaucoup de producteurs réalisent seuls cette opération d'irrigation, mais il existe toujours la possibilité de louer les services d'un journalier spécialisé (*regador* en espagnol). L'emploi d'un *regador* se rencontre, entre autres, chez les personnes ne pouvant réaliser seul ce travail pour des raisons physiques (les personnes âgées ne réalisent pas ce genre de travail), ou culturelles (les femmes participent peu au travail d'irrigation). D'autres producteurs utilisent également les services des *regadores* notamment pour résoudre certaines contraintes de travail au sein du système de production.

Ces travailleurs spécialisés n'ont pas toujours d'incitations directes à gérer l'eau, mais plutôt à minimiser le travail fourni. L'objectif du *regador* est donc souvent en complète opposition avec une économie d'eau. En l'absence de supervision de la part du propriétaire, les travaux d'irrigation sont souvent très peu efficaces en terme d'utilisation de l'eau.

En ce qui concerne les cultures irriguées par la main d'œuvre familiale, nous devons distinguer deux types de travaux, $BTIRRI_{ai,t}$ pour les travaux d'irrigation et $BTRAV_{ai,t}$ pour les autres, et donc deux types de main d'œuvre ($DFIRR_{f,t}$ pour la main d'œuvre familiale pouvant réaliser les travaux d'irrigation, $DF_{f,t}$ pour les autres). Les familiaux pouvant réaliser des travaux d'irrigation, peuvent également réaliser les autres travaux, mais pas l'inverse. On aura donc recours à une variable de transfert $TRANS_{f,t}$ entre les deux ressources $DFIRR_{f,t}$ et $DF_{f,t}$, pour ne pas cantonner les personnes qualifiées au seul travail d'irrigation (Hazell et Norton, 1986 ; Boussard et Daudin, 1988).

Tout d'abord, nous avons donc une répartition des superficies cultivées entre celles irriguées par de la main d'œuvre familiale et celles irriguées par l'intermédiaire d'un regador.

$$XF_{f,ai} + XR_{f,ai} = X_{f,ai} \quad (6.6)$$

où $XF_{f,ai}$ est la superficie de la culture ai irriguée par la famille f (variable endogène exprimée en ha), et $XR_{f,ai}$ est la superficie de la culture ai irriguée par un regador (variable endogène exprimée en ha).

Pour les travaux d'irrigation réalisés par la main d'œuvre familiale, nous aurons une première contrainte de travail, à chaque période :

$$\sum_{ai} (XF_{f,ai} \cdot btirr_{ai,t}) + TRANS_{f,t} \leq DFIRR_{f,t} \quad (6.7)$$

Pour les travaux d'irrigations réalisés par les « *regadores* », nous aurons :

$$\sum_{ai} (XR_{f,ai} \cdot btrekad_{ai,t}) \leq REGAD_{f,t} \quad (6.8)$$

où $REGAD_{f,t}$ est la quantité de main d'œuvre salariée spécialisée en irrigation (regadores) (variable endogène exprimée en jours), et $btrekad_{ai,t}$ est la quantité de main d'œuvre salariée spécialisée en irrigation nécessaire pour irriguer une unité de surface de la culture ai durant la période t (variable exogène exprimée en jours/ha).

Les temps $btirr$ et $btrekad$ sont explicitement différents car on ne considère pas le même type de travail. Dans le cas de la main d'œuvre familiale

on s'intéresse aux heures effectivement consacrées à l'irrigation, elle constitue alors un certain pourcentage (dépendant de l'option d'irrigation prise) du temps d'irrigation.

Dans le cas du regador, on s'intéresse au temps complet d'irrigation. Même si le regador n'est pas non plus toujours présent sur la parcelle lors des irrigations, il facture la totalité du temps d'irrigation au producteur.

On supposera ici que le producteur arrive à imposer une technique à un regador, même si cela est contre son intérêt. Cela suppose donc un travail de surveillance de la part du producteur ($TSURV_{f,t}$), quand l'intérêt du regador n'est pas compatible avec l'intérêt du producteur (cas des techniques de maximisation du rendement net d'irrigation par exemple).

$$TSURV_{f,t} = \text{tauxSurv} \cdot REGAD_{f,t} \quad (6.9)$$

où tauxSURV est le ratio de surveillance, i.e. temps de surveillance nécessaire de la part de la famille pour contrôler l'ouvrier irriguant (variable exogène sans unité).

Pour les autres travaux (hors irrigation), nous aurons une seconde contrainte :

$$\sum_{f,ai} X_{f,ai} \cdot BTRAV1_{ai,t} + \sum_{f,nai} Y_{f,nai} \cdot BTRAV2_{nai,t} - TRANS_{f,t} + TRAVOFF_{f,t} - JOURN_{f,t} \leq DF_{f,t} \quad (6.10)$$

où $BTRAV1_{ai,t}$ est le temps des travaux pour la culture ai durant la période t , $BTRAV2_{nai,t}$ est le temps des travaux pour la culture nai durant la période t . Ces deux dernières variables exprimées en jour/ha sont exogènes. $TRAVOFF_{f,t}$ sont les temps de travaux réalisés par la main d'œuvre familiale hors de l'exploitation agricole durant la période t et $JOURN_{f,t}$ la main d'œuvre salariée journalière employée durant la période t (variables endogènes exprimées en jours).

6.4.3.3 La disponibilité en travail familial

Pour chaque période on doit donc connaître la disponibilité en travail familial ($DFIRR_{f,t}$ et $DF_{f,t}$).

Chaque personne du ménage a une disponibilité totale ($WDISP_{p,t}$) en travail calculée en jours et déterminé de manière exogène, qu'elle répartira

entre les travaux réalisés dans l'exploitation et les travaux réalisés en dehors de l'exploitation. Deux marchés du travail, local ou émigration internationale sont considérés (Taylor et Adelman, 1996).

La décision de migration internationale est envisageable de deux manières. On peut la considérer comme une décision endogène au modèle : compte-tenu de son coût d'opportunité du travail, chaque membre de la famille décide de migrer ou non, ou comme une décision exogène au modèle. On ne quantifiera alors que les conséquences au niveau du ménage de décisions prises.

Nous avons testé les deux formulations du problème lors des exercices de simulation. Nous ne développerons ici que la première option, puisque la deuxième consiste à fixer de manière exogène pour chaque individu s'il a migré ou non. Pour le premier cas, le coût d'opportunité de la migration internationale dépendra :

- de l'âge de la personne (une personne au-delà de 45 ans ne se lancera pas ou plus dans l'aventure de la migration),
- de son savoir-faire professionnel et de son niveau scolaire,
- s'il est déjà allé ou non aux Etats-Unis,
- du réseau familial ou villageois de migrants existant aux Etats-Unis.

La difficulté de la modélisation réside dans le fait que les stratégies de migration sont le résultat de stratégies individuelles (comparaison des opportunités de salaires au sein de l'exploitation, locales et internationales), et collectives (je pars aux États-Unis pour permettre au plus jeune d'étudier ou à papa de rester sur l'exploitation tant qu'il est vivant). Cela se reflète donc dans le jeu des contraintes.

Nous définirons tout d'abord deux variables correspondant pour la première au travail aux Etats-Unis, et pour la seconde au travail au Mexique, hors de l'exploitation familiale.

- $TRAVUS_p$ est une variable binaire, 0 (je ne pars pas aux Etats-Unis) ou 1 (je pars aux Etats-Unis). La décision (endogène au modèle) est prise par chaque personne en début de période et pour toute la période.
- $TRAVOFF_{p,t}$ est une variable endogène et continue, et représente le temps de travail loué à l'extérieur sur le marché local. Le travail local n'empêche pas les activités agricoles, et leur est donc complémentaire.

Si la personne p est aux Etats-Unis, elle ne peut louer sa force de travail dans les environs proches de l'exploitation familiale, ni ne peut participer aux

travaux sur l'exploitation. Nous devons donc décrire des règles du type :

« Si $TRAVUS_p = 1$ alors $TRAVOFF_{p,t} = 0$ et $DISPO_{p,t} = 0$ ».

Ce que nous traduirons pour chaque membre du ménage, et chaque période du premier cycle par :

$$WDISPO_{p,t} \cdot (1 - TRAVUS_p) = DISPO_{p,t} + TRAVOFF_{p,t} \quad (6.11)$$

Comme les variables sont toutes positives, si $TRAVUS_p = 1$, l'équation 6.11 impose effectivement que $DISPO_{p,t} = 0$ et $TRAVOFF_{p,t} = 0$. Si $TRAVUS_{p,t} = 0$, la force de travail est répartie entre le travail sur l'exploitation et le travail extérieur local.

L'ensemble des disponibilités individuelles constitue la disponibilité totale familiale pour les périodes considérées. On réalisera ce type d'opération pour les personnes pouvant réaliser les travaux d'irrigation et les autres :

$$\sum_p DISPO_{p,t} = DFIRR_t \text{ pour les personnes pouvant irriguer.}$$

$$\sum_p DISPO_{p,t} = DF_t \text{ pour les autres.}$$

Si toutes les personnes en âge de travailler décident d'émigrer, la main d'œuvre familiale n'est plus disponible. Le producteur pourrait contracter la main d'œuvre extérieure pour réaliser les travaux agricoles, cependant ce serait oublier le besoin de supervision et de coordination des opérations. Pratiquement, le ménage dispose donc de deux solutions alternatives :

- Continuer à gérer son exploitation au travers d'un gérant d'exploitation qui emploiera éventuellement de la main d'œuvre temporaire pour réaliser les travaux. Le gérant est nécessaire pour superviser la main d'œuvre.
- Mettre toutes les terres possédées sur le marché de la location. Le gérant n'est alors plus nécessaire.

Nous avons retenu uniquement la deuxième solution, observée en général sur le terrain (Barry, 2001).

Finalement, on pourra prendre en compte les stratégies du type « je reste pour que mon papa puisse rester au Mexique » en donnant un coût d'opportunité de migration fortement négatif au père.

Les tests conduits sur les deux options montrent que s'il est techniquement faisable de réaliser la première option moyennant des coûts d'opportunité adéquat, celle-ci présente le grand désavantage de devoir faire appel à

la programmation par entiers (*mixed integer programming*). On ne peut plus alors utiliser les résultats duaux, et on perd une série d'outils de validation du modèle, sans toutefois gagner beaucoup pour l'explicitation de notre question. Par ailleurs, nous ne pouvons utiliser la programmation par entiers dans notre traitement des interactions stratégiques entre producteurs (voir infra, pour la formulation MCP). Nous avons donc décidé d'utiliser la deuxième option et d'exogénéiser la décision de migration. Dans notre modèle, ne seront considéré que les membres du ménage, présents dans l'exploitation. Les revenus de la migration sont représentés par l'intermédiaire d'une variable $remit_{f,t}$, correspondant aux transferts d'argent provenant de la migration.

6.4.3.4 Les contraintes de financement

Pour chaque période, le producteur doit disposer d'une trésorerie suffisante pour pouvoir faire face aux besoins de consommation courants du ménage, aux achats d'intrants nécessaires pour la production agricole et aux remboursements de crédits⁵.

Pour chaque période de trésorerie considérée, nous devons donc avoir un solde final positif permettant d'assurer la consommation minimale du ménage. Du fait du découpage en deux cycles, et de commodité ultérieure de modélisation, nous avons explicité chaque contrainte de trésorerie.

L'année de production est découpée en onze périodes de tailles variables. Cependant, dans un souci de concision, nous ne présenterons ici que les balances de trésorerie de la période 1, 2 et 6. Les balances de trésorerie ne représenteraient que des répétitions. Pour chacune des périodes, nous aurons des entrées et des sorties de trésorerie.

Les entrées de trésorerie Dans les entrées de trésorerie, nous comptabiliserons (a) la vente de produits agricoles, (b) les ventes de travail temporaire à l'extérieur de l'exploitation agricole (voir section ci-dessus), (c) les transferts d'argent provenant des migrants, et (d) les crédits de campagne.

⁵Ces contraintes existent même dans des contextes où l'accès au crédit est relativement aisé (Blancard *et al.*, 2003). Dans notre contexte, l'accès au crédit institutionnel par les petits producteurs est sévèrement limité, les remises d'argent provenant de la migration servent donc également à augmenter les capacités de financement de campagne des producteurs

Les sorties de trésorerie Nous comptabiliserons :

(a) *les achats d'intrants* (semences, engrais, pesticides) proportionnels aux surfaces cultivées. Les consommations d'intrants pour une culture donnée sont considérées fixes, en d'autres termes elles ne dépendent pas des états de nature. Pour des raisons pratiques, le détail des consommations en intrants, et des prix n'apparaîtront pas directement dans le modèle d'optimisation. Elles seront en fait stockées dans la base de données, et transmises sous forme compacte (pré-calculées) au modèle. Trois clarifications importantes sont nécessaires sur les intrants et leurs consommations. Tout d'abord, le coût des intrants est supposé connu au début de la saison (i.e. au moment de la prise de décision. Il n'y a donc pas incertitude sur les prix des intrants. Ensuite, les quantités d'intrants appliquées par le producteur ne varient pas en fonction des états de nature. Implicitement donc, on interdit au producteur tout ajustement tactique au cours du cycle sur les doses d'intrants apportées, en fonction des états de nature. Enfin, pour les coûts des travaux nécessitant un tracteur ou plus généralement les travaux mécanisés (labour, hersage, semis, binage, récolte), les producteurs de la région, soit disposent des outils requis, soit font appel à des producteurs (généralement dans le voisinage) ayant cet équipement, et qui prêtent leur service moyennant rémunération. En ce qui concerne notre modèle, c'est le coût de marché du service que nous avons pris en considération, comme coût observé ou comme proxy au coût total de l'utilisation de matériel.

(b) *Le coût de l'irrigation* sera isolé comme intrant particulier (cf. section spéciale sur le coût individuel de l'irrigation).

(c) *Les remboursements de crédit* : les crédits de campagne sont remboursés en fin de cycle. Le coût du loyer de l'argent est fixé à 15% par cycle, ce qui correspond au coût moyen du crédit observé dans la région.

(d) *Les dépenses de consommation par la famille*, alimentation et habillement par exemple, sont proportionnels au nombre de personnes composant le ménage.

Pour la première période, et pour chaque état de nature, nous aurons donc :

$$bdeb_f - consofam_{f,1} - COUTINDEAU_{f,a} + EMPRUNT1_{f,n} \\ - (1 + ctrans) \cdot pjourn \cdot JOURN_{f,1}$$

$$\begin{aligned}
& + (1 - ctrans) \cdot pjourn \cdot TRAVOFF_{f,1} \\
& - pregad \cdot REGAD_{f,1} + remit_{f,1} \\
& + \sum_{ai} (X_{f,ai} \cdot (ventesi_{ai,1,n} - cpa1_{ai,1})) \\
& + \sum_{nai} (Y_{f,nai} \cdot (ventesni_{nai,1,n} - cpa2_{nai,1})) = \\
& BF1_{f,n} \quad (6.12)
\end{aligned}$$

où $bdeb_f$ est le solde de trésorerie initial (Pesos / exogène), $BF1_{f,n}$ est le solde de trésorerie à la fin de la période 1, sous l'état de nature n (Pesos / endogène), $EMPRUNT1_{f,n}$ est le montant des emprunts contractés durant la période 1 sous l'état de nature n (variable endogène exprimée en pesos), $pjourn$ est le coût journalier d'un salarié (variable exogène exprimée en Pesos/jour), $pregad$ est le coût journalier d'un salarié irriguant (variable exogène exprimée en Pesos/jour), $remit_{f,1}$ est le montant des transferts en provenance des familiaux ayant migrés (variable exogène exprimée en Pesos/jour), $ventesi_{ai,t,n}$ correspond aux ventes des produits des cultures ai (variable exogène exprimée en Pesos/ha), $cpa1_{ai,t}$ sont les coûts en intrants autres que l'eau pour les cultures ai (variable exogène exprimée en Pesos/ha), $ventesni_{nai,t,n}$ sont les ventes des produits des cultures nai (variable exogène exprimée en Pesos/ha), $cpa2_{nai,t}$ sont les coûts en intrants autres que l'eau pour les cultures nai (variable exogène exprimée en Pesos/ha) et $ctrans$ représentent les coûts de transaction sur le marché du travail (exprimé en % du taux journalier).

Pour la deuxième période, qui nous permettra de montrer les transferts de trésorerie d'une période sur l'autre, nous aurons :

$$\begin{aligned}
& BF1_{f,n} - consofam_{f,2} - COUTINDEAU_{f,2} + EMPRUNT2_{f,n} \\
& - (1 + ctrans) \cdot pjourn \cdot JOURN_{f,2} \\
& + (1 - ctrans) \cdot pjourn \cdot TRAVOFF_{f,2} \\
& - pregad \cdot REGAD_{f,2} + remit_{f,2} \\
& + \sum_{ai} (X_{f,ai} \cdot (ventesi_{ai,2,n} - cpa1_{ai,2})) \\
& + \sum_{nai} (Y_{f,nai} \cdot (ventesni_{nai,2,n} - cpa2_{nai,2})) = \\
& BF2_{f,n} \quad (6.13)
\end{aligned}$$

Enfin, pour la sixième période, correspondant aux remboursements des prêts contractés durant le premier cycle, nous aurons :

$$\begin{aligned}
& BF5_{f,n} - consofam_{f,6} - COUTINDEAU_{f,6} \\
& - (EMPRUNT1_{f,n} + EMPRUNT2_{f,n} + EMPRUNT3_{f,n} \\
& + EMPRUNT4_{f,n} + EMPRUNT5_{f,n}) \cdot tauxCredit \\
& - (1 + ctrans) \cdot pjourn \cdot JOURN_{f,6} \\
& + (1 - ctrans) \cdot pjourn \cdot TRAVOFF_{f,6} \\
& - pregad \cdot REGAD_{f,6} + remit_{f,6} \\
& + \sum_{ai} (X_{f,ai} \cdot (ventesi_{ai,6,n} - cpa1_{ai,6})) \\
& + \sum_{nai} (Y_{f,nai} \cdot (ventesni_{nai,6,n} - cpa2_{nai,6})) = \\
& BF6_{f,n} \quad (6.14)
\end{aligned}$$

6.4.3.5 Les contraintes de crédit

Le crédit à la disposition des producteurs est en général sévèrement limité. Nous avons donc introduit des contraintes de crédit par cycle de production :

$$\begin{aligned}
& EMPRUNT1_{f,n} + EMPRUNT2_{f,n} + EMPRUNT3_{f,n} \\
& + EMPRUNT4_{f,n} + EMPRUNT5_{f,n} \leq LIMEMP1_f \quad (6.15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& EMPRUNT7_{f,n} + EMPRUNT8_{f,n} + EMPRUNT9_{f,n} \\
& + EMPRUNT10_{f,n} \leq LIMEMP2_f \quad (6.16)
\end{aligned}$$

où $LIMEMP1_f$ et $LIMEMP2_f$ sont les limites de crédit déterminées de manière exogènes.

6.4.3.6 Le coût global et individuel de l'eau d'irrigation

Tarification uniforme Le calcul du coût d'extraction global sert de point de départ au calcul du coût individuel. Les coûts individuels dépendent donc de la répartition des coûts, et du type de tarification de l'électricité (uniforme

versus par paliers).

Pour chaque période t , la consommation électrique globale du puits est donc :

$$coutEAU_t = pelec \cdot effelec \cdot prof \cdot \sum_{ai} X_{ai,f} \cdot eau_{ai,t} \quad (6.17)$$

où $pelec$ est le prix de l'électricité dans le cas d'une tarification uniforme (Pesos/kW), $effelec$ est l'efficacité électromécanique du puits, c'est à dire la quantité d'électricité nécessaire pour élever une unité d'eau d'une unité de distance (KW/m³/m) et $prof$ est la profondeur dynamique du puits (m).

Tarification par blocs Dans le cas d'une tarification par blocs, on répartit tout d'abord la consommation globale entre les différents paliers :

$$\begin{aligned} \sum_{f,ai} (X_{f,ai} \cdot EAU_{ai,t} \cdot kwparam3) - dif_t^1 &\leq borne1 \\ \sum_{f,ai} X_{f,ai} \cdot EAU_{ai,t} \cdot kwparam3 - dif_t^2 &\leq borne2 \\ \sum_{f,ai} X_{f,ai} \cdot EAU_{ai,t} \cdot kwparam3 - dif_t^3 &\leq borne3 \end{aligned} \quad (6.18)$$

Ce qui nous permet d'établir le coût global d'extraction :

$$\begin{aligned} \left(\sum_{f,ai} (X_{f,ai} \cdot EAU_{ai,t} \cdot kwparam3) - dif_t^1 \right) \cdot ppal1 &+ \\ (dif_t^2 - dif_t^1) \cdot ppal2 &+ \\ (dif_t^3 - dif_t^2) \cdot ppal3 &+ \\ dif_t^3 \cdot ppal4 &= coutEau_t \end{aligned} \quad (6.19)$$

Coût individuel de l'eau Le coût global d'irrigation est alors réparti entre les différents membres du groupe. On représentera ici, une répartition au pro-rata des surfaces irriguées. On aura donc :

$$COUTINDEAU_{f,t} = \frac{coutEAU_t}{\sum_{ai} X_{f,ai} \cdot PAIE_{ai,t}} \quad (6.20)$$

où $PAIE_{ai,t}$ est un paramètre binaire exogène égal à 1 quand l'activité ai a nécessité de l'eau durant la période t .

6.5 Fonction objectif et prise en compte du risque

Comme nous l'avons justifié précédemment, nous avons retenu une représentation inspirée du modèle MOTAD, proposée par Donaldson *et al.* (1995) pour modéliser l'effet du risque sur les décisions des producteurs :

$$E(U(\tilde{w})) = E(\tilde{w}) - \rho \cdot \sum_n (devNeg_n + devPos_n) \quad (6.21)$$

où $devNeg_n$ et $devPos_n$ sont définies comme des valeurs positives correspondant aux déviations négatives et positives du revenu par rapport à la moyenne.

Le calcul de la moyenne des revenus provient des 2 équations :

$$\begin{aligned} & \sum_{ai,t} X_{f,ai} \cdot (ventesI_{ai,t,n} - cpa1_{ai,t}) + \\ & \sum_{nai,t} Y_{f,nai} \cdot (ventesNI_{nai,t,n} - cpa2_{nai,t}) + \\ & \sum_t (TRAVOFF_{f,t} \cdot pjourn \cdot (1 - ctrans) - REGAD_{f,t} \cdot pregad - \\ & JOURN_{f,t} \cdot pjourn \cdot (1 + ctrans) - COUTINDEAU_{f,t}) - \\ & (EMPRUNT1_{f,n} + EMPRUNT2_{f,n} + EMPRUNT3_{f,n} + \\ & EMPRUNT4_{f,n} + EMPRUNT5_{f,n} + EMPRUNT7_{f,n} + \\ & + EMPRUNT8_{f,n} + EMPRUNT9_{f,n} \\ & + EMPRUNT10_{f,n}) \cdot tauxCredit = REV_{f,n} \end{aligned} \quad (6.22)$$

$$REVMOY_f = \frac{1}{n} \cdot \sum_n REV_{f,n} \quad (6.23)$$

Le calcul des déviations par rapport à la moyenne peut donc s'effectuer à l'aide des variables positives $devNEG_{f,n}$ et $devPOS_{f,n}$

$$REV_{f,n} - REVMOY_f + devNEG_{f,n} - devPOS_{f,n} \geq 0 \quad (6.24)$$

Les trois équations précédentes nous permettent donc de définir une fonction objectif du producteur qui prenne en compte de manière simple l'aversion au risque des producteurs.

$$REVM OY_f - \rho \cdot \sum_n (devNEG_{f,n} - devPOS_{f,n}) \quad (6.25)$$

6.6 Modélisation de l'équilibre coopératif

Nous cherchons maintenant à modéliser, le comportement de l'ensemble des producteurs du collectif. Pour ce faire nous procéderons successivement à deux hypothèses sur le comportement des producteurs. Dans un premier temps, on prêterait aux producteurs un comportement coopératif, puis dans les chapitres suivants nous développerons le mode non-coopératif.

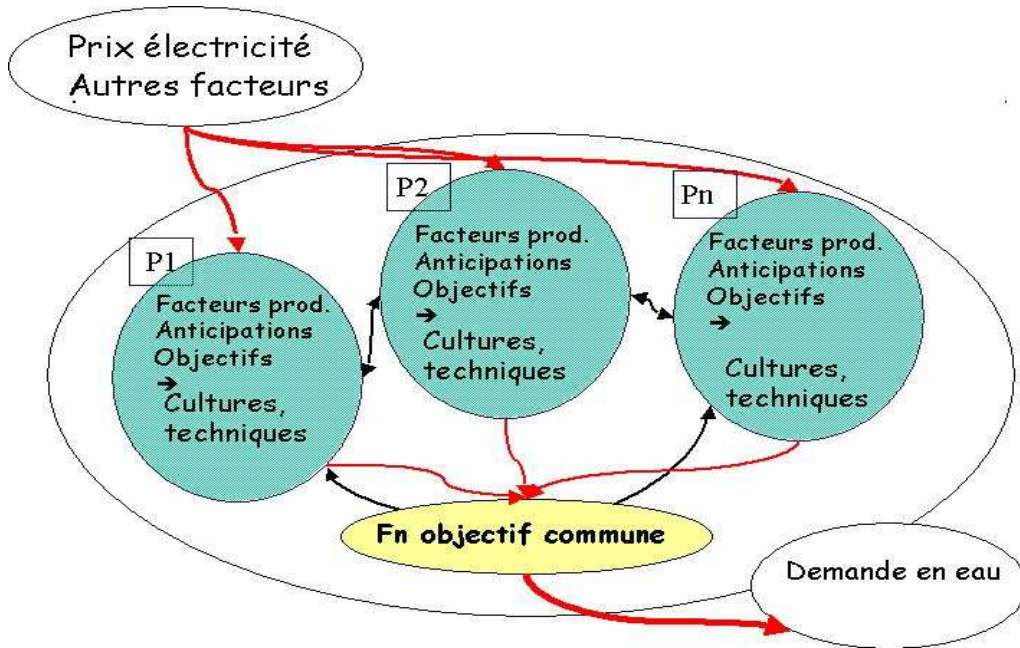


FIG. 6.1 – Représentation schématique d'un puits coopératif.

Dans ce chapitre, nous nous consacrons à la modélisation d'un puits collectif où la coopération entre les producteurs est supposée parfaite. Cette situation idéale correspond à un puits où les producteurs cherchent à maximiser une fonction objectif commune, chacun des producteurs ayant des contraintes propres liées à sa dotation en facteurs (Figure 6.1). Par ailleurs, le groupe

connaît des contraintes globales comme, par exemple, des contraintes de tour d'eau. Enfin, l'objectif étant unique, on calcule une fonction de coûts d'extraction de l'eau pour le groupe, sans chercher à connaître la répartition de ces coûts entre les producteurs. On occulte donc volontairement les questions de répartition des bénéfices et de transferts entre producteurs.

En termes de modélisation, on procède à la maximisation d'une fonction objectif unique résultat de la somme des fonctions d'utilité individuelles, sous les différentes contraintes individuelles et globales (Figure 6.2).

Max $U^1(x_1, x_2, \dots, x_n) + U^2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \dots + U^n(x_1, x_2, \dots, x_n)$		
Producteur 1	Producteur 2	Producteur n
$G^1(x_1) \leq 0$	$G^2(x_2) \leq 0$	$G^3(x_3) \leq 0$
Contraintes globales $H(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$		
Coûts d'extraction $E(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$		

FIG. 6.2 – Modèle conceptuel d'un puits non-coopératif.

Le modèle sur lesquels nous travaillons est donc une agrégation simple des modèles d'exploitation constituant le groupe. La fonction objectif est une somme des fonction d'utilité des producteurs :

$$Z = \sum_f (RevMoy_f + \rho_f \sum_n (devNeg_{f,n} + devPos_{f,n})) \quad (6.26)$$

Avec ce modèle ainsi construit, nous analyserons l'impact des instruments envisagés sur les réactions individuelles et collectives.

6.7 Les données

Trois grands types de données ont été nécessaires pour l'élaboration des modèles. En ce qui concerne les données économiques, les prix des produits agricoles proviennent des séries de prix obtenues par des données secondaires, et pour lesquels nous avons vérifié la cohérence avec les données d'enquêtes réalisées. Les prix des intrants agricoles proviennent des données recueillies auprès des agriculteurs de la région lors des diverses enquêtes de caractérisation de la zone d'étude (Barry, 2001 ; Carrère, 2001b ; Jourdain *et al.*, 2001b). De même, les données techniques générales (temps de travaux, utilisation d'intrants autres que l'eau) proviennent des enquêtes réalisées auprès des ménages. Les coefficients d'utilisation de l'eau proviennent des données simulées à partir de modèles de bilan hydriques (Chapitre 5).

Nous détaillons ici les traitements opérés sur les données avant leur intégration dans les modèles.

6.7.1 Les prix des produits agricoles

Nous disposons d'une série de prix moyens payés aux agriculteurs des principales commodités agricoles de la région pour la période 1980-2000 en Pesos mexicains réels et en Pesos mexicains constants de 1994 (CIMMYT, 2002) (Table F.1, page 333 et F.2, page 334).

Le prix des céréales de base montre une tendance marquée à la baisse depuis ces 20 dernières années (figure 6.3 et 6.4). On peut raisonnablement penser que les producteurs ont intégré cette baisse tendancielle dans leurs anticipations de prix.

	Blé	Orge	Maïs	Sorgho	Brocoli	P.Chiche
Intercept	38146,7	48776,1	84520,5	59569,6	9075,8	56319,0
t	-18,79	-24,11	-42,0	-29,6	-4,1	-27,8
r ²	0,46	0,76	0,9	0,8	0,02	0,4
Estim. 2001	545,6	527,4	450,1	333,0	973,7	777,4
Pour le brocoli, la régression étant non significative, nous avons pris la moyenne des 20 dernières années						

TAB. 6.1 – Résultats des régressions linéaires sur le temps et estimation des prix réels pour l'année 2001

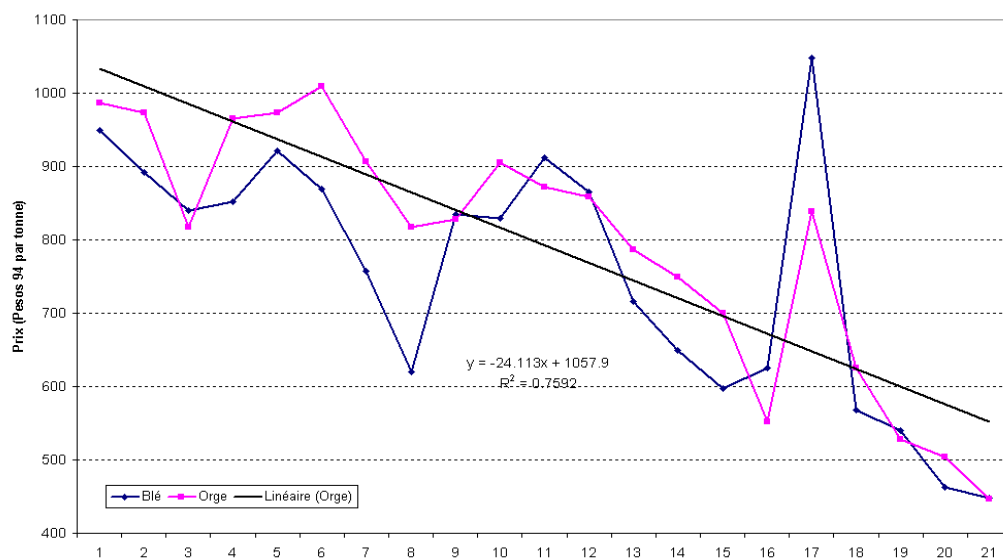


FIG. 6.3 – Evolution du prix du blé et de l'orge (Guanajuato 1980-2000).

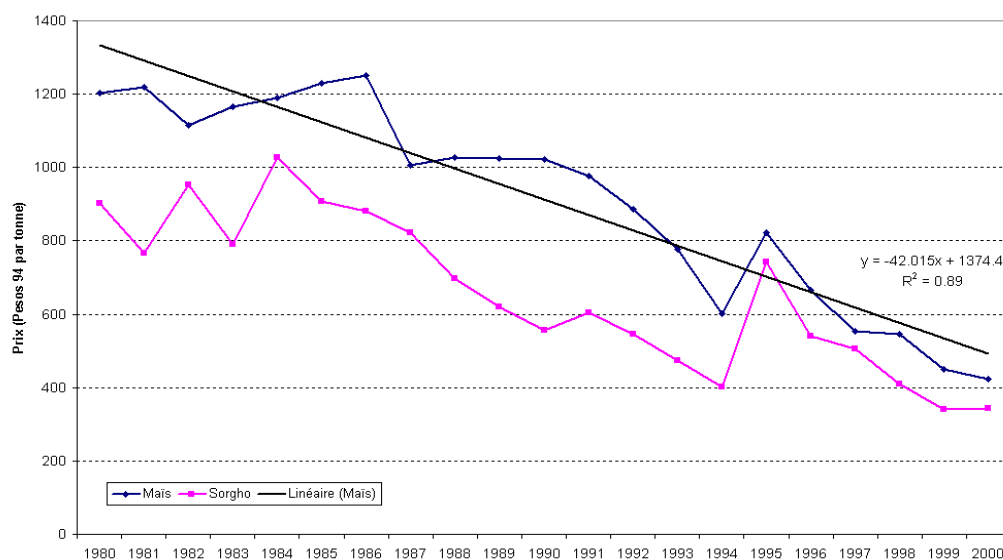


FIG. 6.4 – Evolution du prix du maïs et du sorgho (Guanajuato 1980-2000)

Pour l'établissement de ces anticipations, nous avons donc opéré de la manière suivante : une première régression linéaire des séries de prix des 20 dernières années sur le temps permet de s'affranchir de la tendance (Table 6.1). A partir des prix épurés de leur tendance, on évalue la variance et les corrélations entre les prix des différentes denrées (Tables 6.2 et 6.3). La table 6.3 montre que certains coefficients de corrélation ne sont pas significativement différents de zéro. Nous n'avons pris en considération que les coefficients significativement différents de zéro avec 15% (Table 6.4). Le calcul de ces mêmes valeurs sur des valeurs brutes donnerait effectivement des résultats erronés car les variances seraient plus élevées, et les corrélations entre prix plus importantes du simple fait de la tendance à la baisse des prix agricoles. Nous avons ensuite généré un ensemble de prix suivant une distribution normale ayant pour moyenne le prix calculé à partir de la droite de régression pour l'année $n+1$ et ayant pour variance celle calculée précédemment. La corrélation entre les variables est également respectée selon une procédure décrite en annexe G.

	Blé	Orge	Maïs	Sorgho	Brocoli	Pois Chiche
Dev St.	124	84	91	102	169	207
Min	-189	-168	-143	-160	-259	-398
Max	408	190	170	232	369	432

TAB. 6.2 – Caractéristiques des prix des denrées agricoles épurées de leur tendance

Les prix retenus pour l'élaboration du modèle sont présentés en annexe F.

6.7.2 Les autres coefficients techniques

Les prix des intrants proviennent des données d'enquêtes spécifiques réalisées dans la zone (Barry, 2001 ; Carrère, 2001b). Pour la cohérence dans la construction des coefficients, les données d'enquêtes ont également été ramenés en Pesos constants de 1994.

Les temps de travaux qu'ils soient d'irrigation ont été évalués à partir des données d'enquêtes et des discussions avec les personnes ressources (techniciens, agronomes du projet, etc.). En effet, les données d'enquêtes disponibles montrent une disparité importante dans les temps de travaux, nous

	Blé		Orge		Maïs		Sorgho		Brocoli	P. Chiche
Blé	1,00									
Orge	0,75 (0,001)	***	1,00							
Maïs	0,34 (0,13)	*	0,48 (0,03)	**	1,00					
Sorgho	0,03 (0,88)		-0,10 (0,65)		0,39 (0,08)	*	1,00			
Brocoli	0,24 (0,29)		0,37 (0,10)	*	0,39 (0,08)	*	-0,18 (0,44)		1,00	
P Chiche	-0,02 (0,95)		0,34 (0,13)	*	0,19 (0,40)		0,02 (0,92)		0,07 (0,75)	1,00

TAB. 6.3 – Coefficients de corrélation entre les prix des différentes denrées agricoles épurées de leurs tendances

	Blé	Orge	Maïs	Sorgho	Brocoli	P. Chiche
Blé	1					
Orge	0,75	1				
Maïs	0,34	0,48	1			
Sorgho	0	0	0,39	1		
Brocoli	0	0,37	0,39	0	1	
P,Chiche	0	0,34	0	0	0	1

TAB. 6.4 – Coefficients de corrélation pris en compte pour la génération des prix

avons donc, dans la plupart des cas, opté pour des valeurs moyennes sur les données d'enquêtes.

Les temps d'irrigation, qu'ils soient gérés par la main d'œuvre familiale, par le biais de main d'œuvre spécialisée, proviennent également de temps d'enquêtes (Gillet et Ollivier, 2002 ; Janaud, 2003). Là encore, les temps d'irrigation montrent une grande diversité. Le chapitre 5 nous a montré les pistes agronomiques pour expliquer ces différences entre producteur : nature du terrain, pente, configuration de la parcelle, etc. Nous avons donc, là encore, opté pour des valeurs moyennes. La cohérence de ces données de temps de travaux avec les apports en eau traités par la modélisation a été soigneusement vérifiée.

Les coefficients de consommation en eau proviennent des simulations présentées dans le chapitre 5. Le producteur aura le choix entre plusieurs pratiques d'irrigation à la raie, correspondant aux options étudiées précédemment : maximisation de la dose nette apportée durant la période impartie (DN), apport de la demande en eau (RN100) et apport de 80% des besoins en eau pour la période donnée (RN80). Ces options d'irrigation sont intégrées au niveau des choix opérés par le producteur. Le producteur aura donc le choix, comme nous l'avons décrit dans la section 6.3.2, entre plusieurs activités composites décrites en annexe F).

6.8 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail les caractéristiques du modèle d'exploitation. Ce modèle, en l'absence d'interactions stratégiques entre les producteurs, devrait nous permettre d'analyser en détail les réactions du producteur aux différentes politiques de prix ou aux différents arrangements institutionnels. Nous avons volontairement limité sa complexité, surtout au niveau du traitement du risque, étant donnée la complexité future qu'engendrera le traitement des interactions stratégiques entre producteurs.

Ce modèle formalisé a ensuite été replacé dans un cadre collectif. Pour ce faire, on devra faire des choix sur le comportement du producteur et son mode de gestion des interactions stratégiques générées par les types de tarifs électriques et les règles internes.

Dans ce chapitre, nous avons donné au groupe une fonction objectif

unique, somme des fonctions objectif des individus constituant le groupe. La coopération entre les différents membres du groupe est donc supposée parfaite. En l'absence d'interactions stratégiques, la modélisation d'un puits collectif résulte donc de l'agrégation simple des modèles individuels d'exploitation.

Avant d'utiliser ce modèle pour des simulations de politique, il nous reste à aborder les comportements non-coopératifs au sein des puits collectifs. C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 7

L'équilibre non-coopératif

7.1 Introduction

Pour la représentation des équilibres non-coopératifs, nous n'avons utilisé jusqu'à présent que des modèles analytiques simples travaillant sur des fonctions de production continues. Ceux-ci avaient pour but principal de présenter, sous forme stylisée, les mécanismes générateurs d'interactions stratégiques entre producteurs (Chapitre 4).

Cependant, l'environnement de production agricole peut difficilement se résumer à un univers sans risques et sans contraintes. Afin d'obtenir une représentation réaliste de l'univers de production, nous avons développé au chapitre précédent un modèle d'exploitation, reposant sur la programmation mathématique, qui permet de prendre en compte les réalités concrètes des producteurs : choix techniques discrets, contraintes globales et individuelles sur l'eau, formation du coût de l'eau, contraintes individuelles (techniques disponibles, contraintes de travail, de trésorerie) des producteurs, etc.

Nous avons également vu que l'agrégation des modèles d'exploitations, et la construction d'une fonction d'utilité du groupe résultant de la somme des utilités individuelles, permet de reproduire les comportements au sein des groupes où régnerait la coopération « parfaite » entre ses membres.

Dans ce chapitre, notre but sera maintenant de développer plus encore le modèle de puits collectif pour qu'il puisse prendre en compte le comportement non-coopératif des producteurs.

Nous passerons tout d'abord en revue les différentes techniques de si-

mulation utilisées dans la littérature qui permettent d'étudier les équilibres non-coopératifs. Nous développerons ensuite le modèle appliqué au cas des puits collectifs étudiés dans les chapitres précédents. Pour ce faire, à partir des mêmes données de base, et des mêmes types de puits, nous construirons des modèles, où le comportement des producteurs est non-coopératif.

7.2 Modélisation MCP

Dans notre revue de la littérature sur la modélisation des marchés oligopolistiques, nous avons évoqué deux grandes familles de modèles : ceux reposant sur un processus itératif de recherche d'équilibre et ceux qui recherchent algorithmiquement l'équilibre de Nash. Nous présentons ici plus en détail ce dernier type d'approche.

Les algorithmes de recherche d'un point d'équilibre peuvent être classés en deux catégories. Une première classe d'algorithmes utilise l'approche du point fixe de Scarf (Scarf, 1979 cité dans (Marcotte, 1988)), alors que la seconde est basée sur des méthodes d'optimisation plus classiques (Marcotte, 1988). Ces derniers sont mieux adaptés à la résolution de problèmes de grandes tailles, ils ont donc retenu notre attention.

Un certain nombre d'auteurs proposent des algorithmes basés sur la formulation du problème en inégalités variationnelles (Marcotte, 1986 et Marcotte, 1988). D'autres reposent sur la formulation du problème en complémentarité mixte ou non-linéaire (Ferris et Pang, 1997). Nous les passons successivement en revue, ainsi que les ponts existants entre les deux méthodes.

7.2.1 Formulation en inégalités variationnelles

Soit $x \in R^n$. On dit que x^* est une solution de l'inégalité variationnelle $IV(F; X)$ associée à la fonction $F : R^n \rightarrow R^n$ et à l'ensemble convexe¹ $X \subseteq R^n$ s'il satisfait l'inéquation² :

$$\langle F(x^*); x^* - x \rangle \leq 0 \quad \forall x \in X \quad (7.1)$$

¹Un ensemble convexe se définit comme le sous-ensemble d'un espace linéaire qui vérifie : $\forall x, y \in S, \theta \cdot x + (1 - \theta)y \in S \quad \forall \theta \in [0, 1]$

²la notation $\langle x; y \rangle = x^T y$ représente le produit scalaire usuel des vecteurs x et y

On note par X^* le sous-ensemble de X satisfaisant 7.1.

Les inégalités variationnelles permettent la représentation mathématique d'équilibres, qu'ils soient physiques, chimiques ou économiques. L'équilibre du système correspond à la solution de l'inégalité variationnelle (Marcotte, 1998).

Soient deux joueurs cherchant à optimiser, sur des ensembles disjoints, une fonction impliquant leurs stratégies respectives. Soient x_i le vecteur des décisions du joueur i (stratégie), X_i son ensemble de stratégies admissibles et $f_i(x_1, x_2)$ sa fonction de gain. La réaction $x_1(x_2)$ du joueur 1 à la stratégie x_2 adoptée par le joueur 2 satisfait :

$$\max_{x_1 \in X_1} f_1(x_1, x_2) = f_1(x_1(x_2), x_2) \quad (7.2)$$

et, symétriquement pour le joueur 2, on obtient :

$$\max_{x_2 \in X_2} f_2(x_1, x_2) = f_2(x_1, x_2(x_1)) \quad (7.3)$$

Si on pose :

$$\begin{aligned} F_1(x_1, x_2) &= f'_1(x_1(x_2), x_2) = \nabla_{x_1} f_1(x_1(x_2), x_2) \\ F_2(x_1, x_2) &= f'_2(x_1, x_2(x_1)) = \nabla_{x_2} f_2(x_1, x_2(x_1)) \end{aligned} \quad (7.4)$$

On montre que les réactions $x_1(x_2)$ et $x_2(x_1)$ peuvent être caractérisées par les conditions du premier ordre :

$$\begin{aligned} \langle F_1(x_1(x_2); x_2); x_1(x_2) - x_1 \rangle &\leq 0 \quad \forall x_1 \in X_1 \\ \langle F_2(x_1; x_2(x_1)); x_2(x_1) - x_2 \rangle &\leq 0 \quad \forall x_2 \in X_2 \end{aligned} \quad (7.5)$$

A l'équilibre, on aura :

$$\begin{aligned} x_1(x_2^*) &= x_1^* \\ x_2(x_1^*) &= x_2^* \end{aligned} \quad (7.6)$$

Le système de conditions nécessaires du premier ordre se reformule comme

7.1 si on pose :

$$x^* = \begin{pmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{pmatrix} \quad (7.7)$$

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (7.8)$$

$$F(x) = \begin{pmatrix} F_1(x_1, x_2) \\ F_2(x_1, x_2) \end{pmatrix} \quad (7.9)$$

$$X = X_1 \times X_2 \quad (7.10)$$

De manière plus générale, la résolution de l'inégalité $IV(F; X)$ permet donc d'identifier l'équilibre non-coopératif correspondant à un jeu à n joueurs.

7.2.2 Conditions de Karush-Kuhn-Tucker (KKT)

Dans le cas le plus simple d'optimisation non-linéaire, nous cherchons à maximiser une fonction continue et différentiable à une variable z , la variable z devant être positive :

$$\min_z f(z); \quad z \geq 0; \quad (7.11)$$

Chiang (1984) nous donne l'intuition du mode de résolution de ce type de problème et de leur relation avec les problèmes de complémentarité. En effet, trois cas de figure sont envisageables :

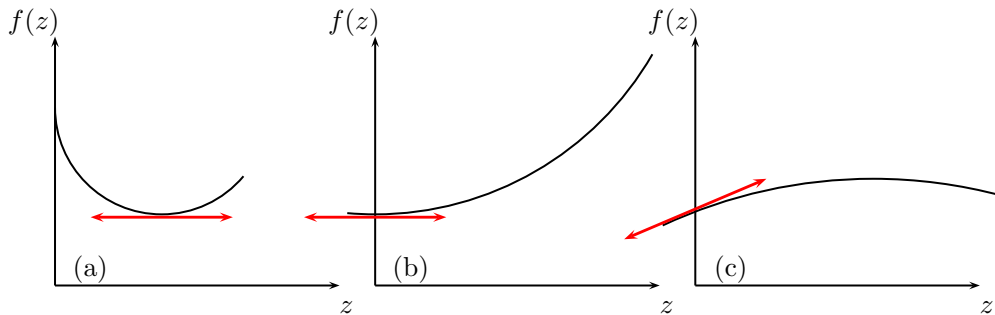


FIG. 7.1 – Les différents cas de figure d'une optimisation non-linéaire sous contraintes

Premièrement la solution peut être une solution intérieure : la condition

de premier ordre pour l'obtention d'un minimum est alors $f'(z) = 0$ et $z > 0$ (Figure 7.1a).

Dans le cas d'une solution non-intérieure, le minimum se situe à la borne inférieure du domaine de validité de la variable de décision, auquel cas nous avons deux possibilités $f'(z) = 0$ et $z = 0$ (Figure 7.1b) ou $f'(z) > 0$ et $z = 0$ (Figure 7.1c). On résume ces trois conditions sous la forme d'un système d'inéquations :

$$f'(z) \geq 0; \quad z \geq 0; \quad z.f'(z) = 0 \quad (7.12)$$

La dernière équation est appelée *relation d'exclusion* et indique que l'une au moins des deux valeurs z ou $f'(z)$ s'annule au maximum. Cette notion a été étendue à des cas plus généraux.

La formalisation générale d'un problème d'optimisation non-linéaire sous contraintes est :

$$\min_z f(z) \quad (7.13)$$

sous les contraintes de

$$z \in Z := \{z \in R^n \mid g(z) \geq 0^m; h(z) = 0^l\} \quad (7.14)$$

où $z \in R^n$ et $f : R^n \rightarrow R, g : R^n \rightarrow R^m, h : R^n \rightarrow R^l$ sont trois fonctions continues et différentiables qui représentent les contraintes sur les variables z .

Pour résoudre le problème, on développe son Lagrangien :

$$Lag(z, \lambda, \mu) = f(z) - \lambda^T . g(z) - \mu^T . h(z) \quad (7.15)$$

où λ et μ sont les vecteurs des variables duales des différentes contraintes. Les conditions de premier ordre pour l'obtention d'une solution z^* sont :

1. $z^* \in Z$ (faisabilité primale du problème)
2. $\lambda^T . g(z) = 0$ (conditions d'exclusion)
3. $\lambda \geq 0^m$ (faisabilité duale)
4. $\nabla_z Lag(z, \lambda, \mu) = 0$ (faisabilité duale)

Ces quatre conditions, couplées avec la condition de régularité au point z , sont connues dans la littérature comme les conditions de Karush-Kuhn-Tucker ou KKT (Ferris et Sinapiromsaran, 1998).

7.2.3 Formulation d'un problème de complémentarité

Etant donnés une fonction $F : R^n \rightarrow R^n$ et deux vecteurs l et u de R^n , le problème de complémentarité mixte, posé dans sa forme canonique consiste à déterminer trois vecteurs z , w et v de R^n qui permettent de résoudre le système d'équations (Rutherford, 2002) :

$$\left\{ \begin{array}{ll} F(z) - w + v & = 0 \\ l \leq z & \leq u \\ w & \geq 0 \\ v & \geq 0 \\ w^T \cdot (z - l) & = 0 \\ v^T \cdot (u - z) & = 0 \\ -\infty \leq l & \leq u \leq \infty \end{array} \right.$$

Il est possible de résoudre des problèmes de programmation linéaire et non-linéaire au moyen de la formulation en complémentarité (Ferris et Sina-piromsaran, 1998).

Etant données les fonctions $f : R^n \rightarrow R^n$, et $g : R^n \rightarrow R^m$, et les vecteurs $l, u \in R^n$, la recherche d'une solution $x \in R^n$ qui maximise la fonction $f(x)$ sous les contraintes $g(x) = 0$ et $\vec{l} \leq x \leq \vec{u}$ peut, quand f est concave et g est convexe se représenter au moyen d'une formulation en complémentarité en posant :

$$z = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (7.16)$$

$$l = \begin{pmatrix} \vec{l} \\ -\infty \end{pmatrix} \quad (7.17)$$

$$u = \begin{pmatrix} \vec{u} \\ +\infty \end{pmatrix} \quad (7.18)$$

$$F(z) = \begin{pmatrix} \nabla f(x) - \nabla g(x)^T \cdot y \\ g(x) \end{pmatrix} \quad (7.19)$$

Nous ne tenterons pas ici de présenter les algorithmes de résolution de ces problèmes. Pour mémoire, on notera cependant les progrès notoires ré-

cents (années 90) dans le développement d'algorithmes robustes, utilisant des méthodes informatiques dépassant les méthodes classiques (pivot, point-fixe, etc.) pour lesquelles des problèmes étaient rencontrés lors de la résolution de problèmes réalistes.

Le concept de *complémentarité* est étroitement lié à la notion de systèmes en équilibre, ce qui explique son utilisation relativement fréquente en économie. Le plus grand nombre d'applications rencontrées tournent autour de l'utilisation de l'équilibre général calculable et d'équilibre spatial (pour un exemple récent voir Piet, 2002). L'équilibre offre-demande est alors représenté par une relation de complémentarité entre deux ensembles de variables de décision. Les conditions de complémentarité, dans ce cas, expriment le fait que l'excès de demande d'une denrée doit être nul si son prix est positif, et qu'inversement le prix d'une denrée est nul s'il y a un excédent d'offre (Ferris et Pang, 1997).

7.2.4 Équilibre non-coopératif et complémentarité mixte

Nous établissons maintenant le lien entre problèmes de complémentarité mixte et recherche d'un équilibre non-coopératif.

Dans la première section, nous avons montré que la recherche d'un point d'équilibre pouvait se ramener à la résolution d'inégalités variationnelles. Par le biais de la formulation primale-duale, on montre maintenant l'équivalence, sous certaines conditions, entre un système d'inégalités variationnelles et un problème de complémentarité mixte.

Un vecteur x de X est une solution de $IV(F, X)$ si et seulement si :

$$x \in \arg \max_{y \in X} \langle F(x), x - y \rangle \quad (7.20)$$

$$= \arg \min_{y \in X} \langle F(x), y \rangle \quad (7.21)$$

Dans le cas où l'ensemble X est compact, et qu'il peut être défini par un système fini d'inégalités ou d'égalités différentiables : $X = \{x : G(x) \leq 0\}$, et que la représentation de X est régulière (au sens de la qualification des contraintes), les conditions nécessaires et suffisantes d'optimalité du pro-

gramme mathématique convexe $\min_{y \in X} \langle F(x), y \rangle$ sont alors :

$$\begin{aligned}
 G(y) &\leq 0 \\
 F(x) + \lambda \cdot G'(y) &= 0 \\
 \langle \lambda, G(y) \rangle &= 0 \\
 \lambda &\geq 0
 \end{aligned} \tag{7.22}$$

En substituant x à y dans le système précédent, on obtient la formulation primale-duale de l'inégalité variationnelle :

$$\begin{aligned}
 G(x) &\leq 0 \\
 F(x) + \lambda \cdot G'(x) &= 0 \\
 \langle \lambda, G(x) \rangle &= 0 \\
 \lambda &\geq 0
 \end{aligned} \tag{7.23}$$

En définissant les nouvelles variables

$$\begin{aligned}
 x_j^+ &= \max(0, x_j) \\
 x_j^- &= \max(0, -x_j) \\
 x &= x^+ - x^- \\
 z &= (x^+, x^-, \lambda)^T
 \end{aligned} \tag{7.24}$$

et une nouvelle fonction

$$H(z) = \begin{bmatrix} F(x^+ - x^-) + G''(x^+ - x^-) \cdot \lambda \\ -F(x^+ - x^-) - G''(x^+ - x^-) \cdot \lambda \\ -G(x^+ - x^-) \end{bmatrix} \tag{7.25}$$

on obtient la formulation de complémentarité non-linéaire.

$$\begin{aligned}
 H(z) &\geq 0 \\
 z &\geq 0 \\
 \langle H(z), z \rangle &= 0
 \end{aligned} \tag{7.26}$$

Donc, si X peut être défini par un système fini d'inégalités ou d'égalités

différentiables, la solution de $IV(F; X)$ est équivalente à la résolution d'un problème de complémentarité via les conditions KKT (Ferris et Pang, 1997).

Grâce à cette propriété, nous pourrions donc utiliser les algorithmes basés sur la formulation de complémentarité pour développer notre modèle de puits non-coopératif.

7.3 Application au puits collectif

7.3.1 Présentation générale

Dans l'hypothèse d'une coopération parfaite entre les différents membres du groupe, les décisions de chacun des membres du groupe avaient pour objectif de maximiser une fonction d'utilité unique au groupe, somme des utilités individuelles. Chacun des producteurs gardait cependant un certain nombre de contraintes qui sont propres à sa dotation en facteurs (Figure 6.1, page 172). Dans ce cadre la règle de répartition des coûts d'extraction entre les membres du groupe n'influaient pas sur les décisions de production, on ne s'intéressait alors qu'au coût global d'extraction de l'eau.

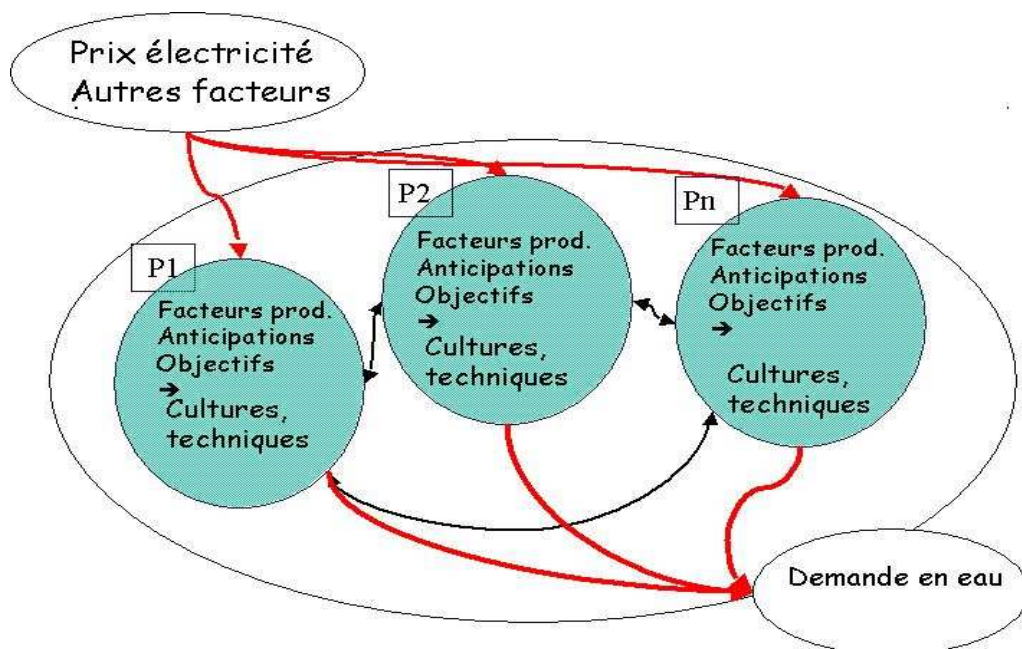


FIG. 7.2 – Représentation schématique d'un puits non-coopératif.

Dans un jeu non-coopératif, chacun des membres du groupe possède maintenant une fonction d'utilité propre qu'il cherche à maximiser (Figure 7.2).

La présence d'interactions stratégiques due à la règle de répartition des coûts implique que l'utilité obtenue par chacun des membres dépend non seulement de ses propres décisions mais également des décisions des autres membres du groupe. La variable de décision (stratégie) de chacun des producteurs est la consommation en eau (via les choix de cultures et de techniques culturales). L'équilibre recherché est le résultat d'une optimisation simultanée de chacun des membres du groupe, sous les contraintes individuelles et globales, et des règles de répartition des coûts entre les différents membres du groupe (Figure 7.3).

Comme montré précédemment, pour la résolution simultanée des problèmes de maximisation sous contraintes nous utiliserons des algorithmes spécialisés, basé sur le principe de résolution de problème de complémentarité mixte (MCP).

Producteur 1	Producteur 2	Producteur n
$\text{Max } U^1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ s.t. $G^1(x_1) \leq 0$	$\text{Max } U^2(x_1, x_2, \dots, x_n)$ s.t. $G^2(x_2) \leq 0$	$\text{Max } U^n(x_1, x_2, \dots, x_n)$ s.t. $G^n(x_n) \leq 0$
<i>Règles de répartition des coûts</i>		
Contraintes globales $H(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$		
Coûts d'extraction de l'eau $E(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$		

FIG. 7.3 – Modèle de puits non-coopératif.

7.3.2 Le modèle de puits non-coopératif

Nous prenons pour point de départ le modèle développé dans les deux chapitres précédents, en l'adaptant aux nouvelles hypothèses de comportement des producteurs : non-coopératif vs. coopératif.

Pour construire le modèle, l'idée de base est que pour obtenir des optima simultanés, on remplace les problèmes individuels par les conditions de premier ordre (KKT). La recherche de l'équilibre revient à la résolution d'un système d'inéquations (parfois complémentaires) où n'apparaissent pas directement les fonctions d'utilité des producteurs. Ce procédé permet de juxtaposer les problèmes d'optimisation des différents producteurs, tout en gardant de manière explicite les interactions stratégiques (Figure 7.4).

Producteur 1	Producteur 2	Producteur n
$\partial \mathcal{L}^1 / \partial x_1 = 0$ $G^1(x_1) \leq 0$ $\mu^1 \cdot G^1 = 0 \quad ; \quad \mu^1 \leq 0$	$\partial \mathcal{L}^2 / \partial x_2 = 0$ $G^2(x_2) \leq 0$ $\mu^2 \cdot G^2 = 0 \quad ; \quad \mu^2 \leq 0$	$\partial \mathcal{L}^3 / \partial x_3 = 0$ $G^3(x_3) \leq 0$ $\mu^3 \cdot G^3 = 0 \quad ; \quad \mu^3 \leq 0$
<i>Règles de répartition des coûts</i>		
Contraintes globales $H(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$		
Coûts d'extraction de l'eau $E(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$		

FIG. 7.4 – Modèle de type MCP du puits non-coopératif

Les conditions KKT : Elles comprennent les contraintes initiales que nous avons déjà développées dans les chapitres précédents (Section 7.2.2, page 184). A chacune de ces contraintes est associée une variable duale (Tableau 7.1). Muni de ces notations, on construit les lagrangiens des problèmes d'optimisation.

Les conditions de faisabilité duales stipulent que les dérivées partielles du Lagrangien par rapport aux variables de décision s'annulent. Nous les détaillons ci-dessous.

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $X_{f,ai}$ nous donne la première équation de faisabilité duale $CoX_{f,ai}$.

$$\begin{aligned}
 lTER1_f &+ lR1_{f,ai} \\
 &+ \sum_t (pm^3 \cdot eau_{ai,t} \cdot lEAU_t)
 \end{aligned}$$

Nom contrainte	Description	Variable duale
$Terre1_f$	Terre dans zone irriguable	$lTER1_{f,t}$
$Terre2_f$	Terre dans zone non irriguable	$lTER2_f$
EG_t	Tour d'eau par période	lEG_t
$REG1_{f,ai}$	Répartition irrigation entre main d'oeuvre familiale et regador	$lR1_{f,ai}$
$REG2_{f,t}$	Irrigation par la famille	$lR2_{f,t}$
$REG3_{f,t}$	Irrigation par le regador	$lR3_{f,t}$
$SURV1_{f,t}$	Surveillance du regador	$lS1_{f,t}$
$TRA_{f,t}$	Travail général	$lTRA_{f,t}$
$CEAU_{f,t}$	Coût de l'eau	$lEAU_{f,t}$
$SIR_{f,t}$	Calcul de la superficie irriguée payante	$lSIR_{f,t}$
$SIR2_{f,t}$	Calcul de la superficie irriguée payante totale	$lSIR_{f,t}$
$REV_{f,n}$	Calcul du revenu annuel aléatoire	$lRU_{f,n}$
$DN_{f,n}$	Calcul des déviations négatives de revenu	$lDN_{f,n}$
$TRES1_{f,n}$	Calcul des trésorerie en période 1	$lB1_{f,n}$
\vdots	\vdots	\vdots
$TRES11_{f,n}$	Calcul des trésorerie en période 11	$lB11_{f,n}$
$EMP1_{f,n}$	Limite supérieure sur les emprunts (cycle 1)	$lEMP1_{f,n}$
$EMP2_{f,n}$	Limite supérieure sur les emprunts (cycle 2)	$lEMP2_{f,n}$

TAB. 7.1 – Liste des contraintes primales et des variables duales correspondantes

$$\begin{aligned}
& + \sum_t (eau_{ai,t} \cdot lEG_t - lSIR_{f,t} \cdot paie_{ai,t}) \\
& + \sum_t (btrav1_{ai,t} \cdot lTRA_{f,t} - lSIR_{f,t} \cdot paie_{ai,t}) \\
& + \sum_t (lSIR2_{f,t} \cdot paie_{ai,t}) \\
& + \sum_n (lB1_{f,n} \cdot (cpa1_{ai,t1} - ventesi_{ai,t1,n})) \\
& + \sum_n (lB2_{f,n} \cdot (cpa1_{ai,t2} - ventesi_{ai,t2,n})) \\
& \dots \\
& + \sum_n (lB11_{f,n} \cdot (cpa1_{ai,t11} - ventesi_{ai,t11,n})) \\
& + \sum_{t,n} (lRU_{f,n} \cdot (cpa1_{ai,t} - ventesi_{ai,t,n})) = 0 \quad (7.27)
\end{aligned}$$

On retrouve le résultat usuel d'égalisation des coûts et des gains marginaux des variables de superficie. Dans ce contexte, chaque ressource, notamment l'eau, est évaluée à son coût réel. Ainsi, dans le coût de l'eau est intégré le coût dual de la contrainte de tour d'eau (lEG_t) et le coût réel de l'eau ($pm^3 \cdot lEAU_t$). La valeur duale $lEAU_t$ est une valeur sans unité qui émane de la fonction de répartition des coûts entre producteur.

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $Y_{f,nai}$ nous donne son équation de faisabilité duale $CoY_{f,nai}$.

$$\begin{aligned}
lTER2_f & + \sum_t (btrav2_{nai,t} \cdot ltra_{f,t}) \\
& + \sum_{t,n} (lRu_{f,n} \cdot (cpa2_{nai,t} - ventesni_{ai,t,n})) \\
& + \sum_n (lB1_{f,n} \cdot (cpa2_{nai,t1} - ventesni_{nai,t1,n})) \\
& + \sum_n (lB2_{f,n} \cdot (cpa2_{nai,t2} - ventesni_{nai,t2,n})) \\
& \dots \\
& + \sum_n (lB11_{f,n} \cdot (cpa2_{nai,t11} - ventesni_{nai,t11,n})) = 0 \quad (7.28)
\end{aligned}$$

On retrouve, la-encore, le résultat usuel d'égalisation des coûts et des gains marginaux des variables de superficie pour la zone non irriguée.

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $XF_{f,ai}$ nous donne son équation de faisabilité duale $CoXF_{f,ai}$:

$$-lR1_{f,ai} + \sum_t btirr_{ai,t} \cdot lR2_{f,t} = 0 \quad (7.29)$$

De même, la dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $XR_{f,ai}$ nous donne son équation de faisabilité duale $CoXR_{f,ai}$:

$$-lR1_{f,ai} + \sum_t btregad_{ai,t} \cdot lR3_{f,t} = 0 \quad (7.30)$$

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $TRANS_{f,t}$ nous donne son équation de faisabilité duale $CoTRANS_{f,t}$:

$$lR2_{f,t} - lTRA_{f,t} = 0 \quad (7.31)$$

La variable $TRANS_{f,t}$ étant une variable de transfert entre main d'oeuvre irriguante et main d'oeuvre autre, on retrouve donc une égalisation des coûts duaux des deux équations dans lesquelles cette variable intervient.

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $REGAD_{f,t}$ nous donne son équation de faisabilité duale $CoREGAD_{f,t}$:

$$-lR3_{f,t1} + tauxSurv \cdot lS1_{f,t1} + \sum_n pregad \cdot (lB1_{f,n} + lRU_{f,n}) = 0 \quad (7.32)$$

...

$$-lR3_{f,t11} + tauxSurv \cdot lS1_{f,t11} + \sum_n pregad \cdot (lB11_{f,n} + lRU_{f,n}) = 0 \quad (7.33)$$

On égalise le gain marginal de l'emploi d'un aiguadier avec son coût global. Dans ce coût, rentrent en compte les effets sur les contraintes de trésorerie (lBx) et le revenu final (lRU), ainsi que les coûts de surveillance ($lS1$)

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $TSURV_{f,t}$ nous donne son équation de faisabilité duale $CoTSURV_{f,t}$:

$$-lS1_{f,t} + lTRA_{f,t} = 0 \quad (7.34)$$

A l'optimum, le producteur égalise le coût d'opportunité de la contrainte

de travail avec celui de la contrainte de surveillance.

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $JOURN_{f,t}$ nous donne l'équation 7.35 de faisabilité duale $CoJOURN_{f,t}$:

$$-lTRA_{f,t} + (1 + ctrans) \cdot pjourn \cdot \sum_n (lRU_{f,n} + lB1_{f,n}) = 0 \quad (7.35)$$

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $TRAVOFF_{f,t}$ nous donne l'équation 7.36 de faisabilité duale $CoTRAVOFF_{f,t}$:

$$lTRA_{f,t} - (1 - ctrans) \cdot pjourn \cdot \sum_n (lRU_{f,n} + lB1_{f,n}) = 0 \quad (7.36)$$

Les équations 7.35 et 7.36 explicitent les choix d'utiliser la main d'oeuvre externe, et de travail temporaire dans les exploitations extérieures. Là encore, on retrouve une égalisation des coûts et des gains marginaux liés aux variables concernées.

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $CEAU_t$ nous donne l'équation 7.37 de faisabilité duale $CoCEAU_t$

$$-lEAU_t + \frac{\sum_n (lRU_{f,n} + lB1_{f,n}) \cdot SUPIR_{f,t}}{SUPIRTOT_t} = 0 \quad (7.37)$$

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $SUPIR_{f,t}$ nous donne l'équation 7.38 de faisabilité duale complémentaire

$$-lSIR_{f,t} - lSIR2_{f,t} + \frac{CEAU_t \cdot \sum_n (lRU_{f,n} + lB1_{f,n})}{SUPIRTOT_t} \quad (7.38)$$

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $SUPIRTOT_t$ nous donne l'équation de faisabilité duale $CoSUPIRTOT_t$

$$-lSIR2_{f,t} + \frac{\sum_n CEAU_t \cdot (lRU_{f,n} + lB1_{f,n}) \cdot SUPIR_{f,t}}{(SUPIRTOT_t)^2} \quad (7.39)$$

La dérivée du Lagrangien par rapport aux variables de décision BFi_t nous donne les équations de faisabilité duale :

$$lB1_{f,n} - lB2_{f,n} = 0 \quad (7.40)$$

...

$$lB10_{f,n} - lB11_{f,n} = 0 \quad (7.41)$$

$$lB11_{f,n} = 0 \quad (7.42)$$

La dérivée du Lagrangien par rapport aux variables de décision $EMPRUNT_{i_{f,n}}$ nous donne les équations de faisabilité duale $CoEMPRUNT_{i_{f,n}}$:

$$lB1_{f,n} + (1 + txCredit) \cdot lB6_{f,n} + lEMP1_{f,n} + txCredit \cdot lRU_{f,n} = 0 \quad (7.43)$$

...

$$lB5_{f,n} + (1 + txCredit) \cdot lB6_{f,n} + lEMP1_{f,n} + txCredit \cdot lRU_{f,n} = 0 \quad (7.44)$$

...

$$lB10_{f,n} + (1 + txCredit) \cdot lB11_{f,n} + lEMP2_{f,n} + txCredit \cdot lRU_{f,n} = 0 \quad (7.45)$$

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $DEVNEG_{f,n}$ nous donne l'équation de faisabilité duale $CoDEVNEG_{f,n}$

$$-lDN_{f,n} + \rho(f) = 0 \quad (7.46)$$

La dérivée du Lagrangien par rapport à la variable de décision $REV_{f,n}$ nous donne l'équation de faisabilité duale $CoREV_{f,n}$

$$-lDN_{f,n} + lRU_{f,n} + \frac{lDN_{f,n} - 1}{n} = 0 \quad (7.47)$$

L'ensemble des équations duales est donc ajouté aux contraintes du modèle classique.

Enfin, on précise clairement à l'algorithme les équations d'exclusion (habituellement symbolisées par le signe \perp).

1. $CoX_{f,ai} \perp X_{f,ai}$
2. $CoY_{f,nai} \perp Y_{f,nai}$
3. $CoXF_{f,ai} \perp XF_{f,ai}$

4. $CoXR_{f,ai} \perp XR_{f,ai}$
5. $CoTRANS_{f,t} \perp TRANS_{f,t}$
6. $CoJOURN_{f,t} \perp JOURN_{f,t}$
7. $CoTRAVOFF_{f,t} \perp TRAVOFF_{f,t}$
8. $CCEAUUNI_t \perp CEAUUNI_t$
9. $CoSUPIR_{f,t} \perp SUPIR_{f,t}$
10. $CoSUPIRTOT_t \perp SUPIRTOT_t$
11. $CoDEVNEG_{f,n} \perp DEVNEG_{f,n}$
12. $CoREV_{f,n} \perp REVUNI_{f,n}$
13. $CoEMPRUNT1_{f,n} \perp EMPRUNT1_{f,n}$
14. \dots
15. $CoEMPRUNT10_{f,n} \perp EMPRUNT10_{f,n}$

La résolution des problèmes de complémentarité demande l'utilisation d'algorithmes spécialisés. Deux algorithmes sont, à notre connaissance, actuellement disponibles : PATH (Ferris et Munson, 2003) et MILES (Rutherford, 1997).

Ces deux solvers sont disponibles, entre autres, sur la plate-forme GAMS (Brooke *et al.*, 1998). Le modèle écrit en GAMS est présenté en annexe ??, page ??.

7.4 Conclusions

Nous avons présenté en détail les caractéristiques du modèle de puits collectif avec les nouvelles hypothèses sur le comportement des producteurs. Le passage du mode coopératif au mode non-coopératif implique que chaque producteur optimise sa propre fonction de production tout en prenant en compte les interactions qu'il a avec les autres producteurs.

Pour analyser les comportements des producteurs dans ce nouveau cadre, nous avons eu recours à des nouveaux outils de modélisation qui permettent la recherche des équilibres non-coopératifs. Parmi les outils de modélisation à notre disposition, nous avons retenu la formulation en complémentarité et l'utilisation d'algorithmes de type MCP. En effet, ceux-ci sont bien adaptés

aux modèles de grande taille et la disponibilité de solvers pour les problèmes de type *MCP* dans le langage GAMS rend l'écriture des modèles relativement aisée.

Ce modèle nous permettra d'analyser en détail les réactions des producteurs aux différentes politiques de prix ou aux différents arrangements institutionnels, et de les comparer aux résultats des modèles développés dans le chapitre précédent.

Troisième partie

**Simulations et analyse des
instruments**

Après une revue des problèmes et la présentation détaillée des choix de modélisation, nous sommes maintenant prêts à les utiliser pour analyser l'impact des instruments de politique sur les systèmes irrigués et sur les systèmes de production qui les composent.

Avec pour objectif final une réduction de la consommation en eau par les puits agricoles, on peut envisager plusieurs instruments (Figure 8.1).

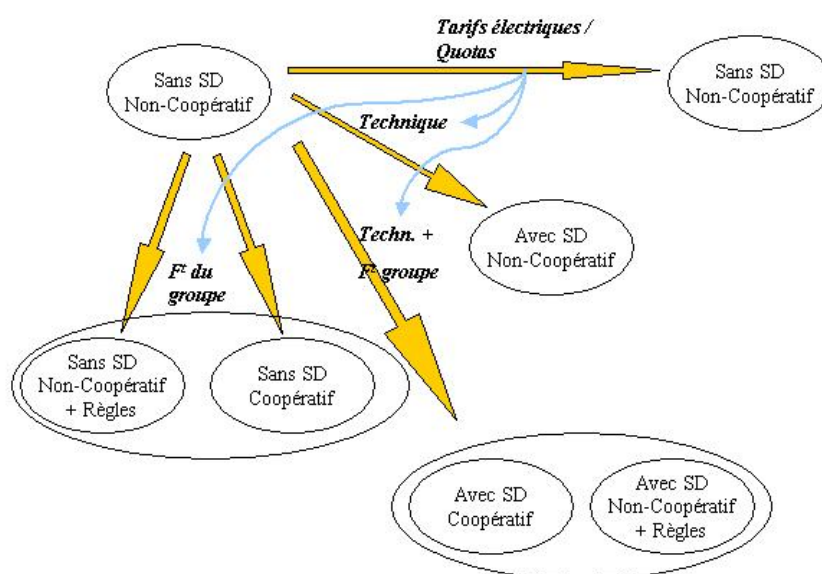


FIG. 8.1 – Les différents instruments

La première batterie de dispositifs étudiés se rattache aux instruments économiques : tarification, quotas, et subventions. Ceux-ci permettent de changer les incitations transmises aux utilisateurs finaux de la ressource. On peut tout d'abord envisager une augmentation du coût de l'eau, ici par le biais de la tarification électrique, afin d'envoyer un signal de rareté de la ressource plus important qu'actuellement. Dans ce domaine, nous verrons deux types de tarification, la tarification uniforme et la tarification uniforme avec remise fixe et leurs implications sur les systèmes. On comparera ces derniers aux quotas d'électricité.

Les décideurs ont également la possibilité de promouvoir un certain nombre

de solutions techniques connues pour les réductions de consommation en eau qu'elles peuvent engendrer. Cet appui au changement technique peut être exclusif ou appliqué en conjonction avec les instruments économiques.

Finalement, les systèmes irrigués étant des systèmes au sein desquels les institutions peuvent générer des interactions stratégiques entre producteurs, on étudiera la pertinence de travailler sur ce thème au niveau des puits collectifs et les gains potentiels que l'on peut en attendre.

Les différents instruments peuvent être combinés afin d'essayer de trouver des synergies et obtenir des résultats plus satisfaisants. Nous verrons qu'une synthèse entre les instruments économiques, techniques et institutionnels peuvent apporter des solutions concrètes tant en termes d'efficacité que d'équité.

Cette dernière partie est divisée en deux chapitres. Le chapitre 8 se consacrera à l'impact au niveau des puits collectifs des différents instruments de politiques. Dans ce chapitre, on supposera un objectif de diminution uniforme des consommations des puits collectifs. Nous chercherons à atteindre deux objectifs de réduction de consommation de respectivement 30 et 45%.

Après avoir analysé les conditions nécessaires à l'obtention de réduction de consommation pour un puits, le chapitre 9 se préoccupe d'une question plus pertinente pour le décideur politique : comment, au niveau de l'aquifère, peut-on amener les puits à diminuer globalement leur consommation de l'ordre de 30 à 45%. A cette échelle, on pourra donc permettre des changements de consommation différenciés entre les producteurs. Nous analyserons donc les transferts, tant en eau qu'en revenus, qui s'opèrent alors entre les différents puits.

Chapitre 8

Analyse des instruments au niveau des puits collectifs

8.1 Introduction

Nous présentons maintenant les résultats des simulations. Après une reproduction de la situation actuelle, nous aborderons les différents instruments qui pourraient permettre de réduire la consommation brute des producteurs. Nous avons envisagé trois grandes classes d'instruments. Premièrement, nous avons évalué l'impact des institutions au sein des puits collectifs sur les consommations et les revenus des producteurs. Deuxièmement, nous avons étudié le potentiel des instruments économiques (tarifications, quotas, subventions). Troisièmement, nous avons estimé le potentiel du changement technique comme instrument de réduction de la consommation. Dans chacun des cas, nous avons évalué leur capacité à diminuer significativement (entre 30 et 45%) la consommation de chacun des types de puits et leur impact sur les revenus des producteurs.

En termes de politiques, nous avons également considéré la pertinence d'une combinaison des différents instruments, afin de détecter les synergies ou les antagonismes potentiels entre les différentes mesures.

8.2 Les groupes

Nous avons une information détaillée sur les producteurs et le mode de fonctionnement des puits collectifs, synthétisée sous la forme de groupes typologiques (Chapitre 3).

Afin de représenter la diversité des situations rencontrées, nous avons repris les grandes caractéristiques de ces puits (Tableau 8.1). Ces paramètres nous ont permis, à partir d'un même modèle générique, d'étudier le comportement différencié des grands types de puits et de producteurs rencontrés. Nous avons « volontairement » limité le nombre de producteurs par groupes à quatre. Si techniquement, l'ajout d'autres producteurs dans les modèles de puits collectifs apparaît possible, elle entraîne une augmentation rapide des temps de réponse des modèles, voire empêche de trouver des solutions convergentes dans des temps raisonnables¹.

Afin d'enrichir notre discussion, nous avons également ajouté deux groupes relativement artificiels par rapport à notre typologie. Le groupe 5 représente un groupe où tous les producteurs ont les mêmes superficies équipées pour l'irrigation, ce qui nous permettra de comparer avec des groupes, plus hétérogènes en termes de superficie. Le groupe 6 est assez similaire au groupe 1b, exception faite de la disponibilité en eau, nous avons donc voulu tester l'effet d'une contrainte moins forte en eau.

Nous avons également introduit une certaine hétérogénéité des producteurs par le biais d'un « *indice de consommation* ». Le terme mérite d'être défini plus précisément ici car il est introduit de manière exogène, c'est à dire comme ne résultant pas d'un choix des producteurs. Par ce coefficient, on entend en effet prendre en compte l'hétérogénéité physique au sein des systèmes irrigués induisant, quoique fassent les producteurs, une différence dans la gestion de l'irrigation : pentes de la parcelle, nature du sol, distance au puits, etc. Un coefficient de 1,05 doit être interprété comme le coefficient multiplicateur des lames d'eau apportées à la parcelle pour une tactique d'irrigation donnée, et donc conduisant au même rendement.

Finalement, par rapport à la typologie des puits, le lecteur attentif aura également remarqué que les groupes 3 et 4 n'ont pas été modélisés ici. Ceci

¹Le temps « raisonnable » est ici fixé à 12 heures pour la simulation d'une courbe de demande (soit pour 33 simulations de prix)

	1a	1b	2	5	6
Débit puits (l/s)	34	34	28	34	40
Profondeur nappe (m)	50	50	65	50	50
Répartition surfaces	5 / 5 / 12 / 12	5 / 5 / 12 / 12	5 / 5 / 12 / 12	8.5/8.5 /8.5/8.5	5 / 5 / 12 / 12
Indice de consommation	0,95 / 1,05 / 0,95 / 1,05	0,95 / 1,05 / 0,95 / 1,05	0,95 / 1,05 / 0,95 / 1,05	0,95 / 1,05 / 0,95 / 1,05	0,95 / 1,05 / 0,95 / 1,05
Cultures permises	Céréales, Fourrages, Pois Chiche	Céréales, Pois chiche	Céréales, Pois chiche	Céréales, Pois chiche	Céréales, Pois chiche

TAB. 8.1 – Caractéristiques générales des puits simulés

se justifie essentiellement pour des raisons de présentation de notre exposé. Les groupes 3 et 4 de la typologie se distinguaient essentiellement par les règles internes : allocation de la ressource, allocation des coûts. Nous avons préféré ici tester ces règles au niveau de toutes les configurations afin d'en tester les effets non-seulement sur ceux qui les ont adoptés, mais également sur les autres types de groupes pour en percevoir la pertinence.

8.3 L'équilibre non-coopératif

Notre situation de référence correspond à des groupes dont les règles internes sont les plus communément rencontrées, c'est à dire pas de quotas internes et une base de tarification entre les producteurs reposant sur les superficies irriguées. Le prix de base de l'électricité est celui du mois de janvier 2002 ramené en Pesos constants de 1994. Nous avons également fait l'hypothèse d'un équilibre initial non-coopératif au sein des puits collectifs.

L'univers des cultures et des techniques possibles des producteurs varie selon les puits envisagés. Cependant, pour tous les producteurs, on suppose tout d'abord que le semis direct sous couverture végétale n'est pas possible sur les cultures céréalières d'hiver². Ceci nous permettra d'étudier par la suite,

²Nous détaillerons plus amplement les caractéristiques de cette technique en cours de développement dans la région dans une section ultérieure

l'effet de l'introduction de cette technique sur les systèmes de production.

Dans la phase de calibrage des modèles, les paramètres d'aversion au risque ont été ajustés afin d'approcher des comportements productifs observés dans les groupes.

8.4 Les gains potentiels de la coopération

8.4.1 En termes de consommation en eau

8.4.1.1 La consommation du groupe

Une consommation moins importante en mode coopératif : Si on considère la consommation collective annuelle du groupe, on constate que les puits collectifs consomment autant ou moins dans le mode coopératif que dans le mode non-coopératif (Figure 8.2). Les interactions stratégiques entre les producteurs générées par la tarification interne engendrent une surconsommation collective par rapport à ce qu'elle serait dans le cadre d'un équilibre coopératif.

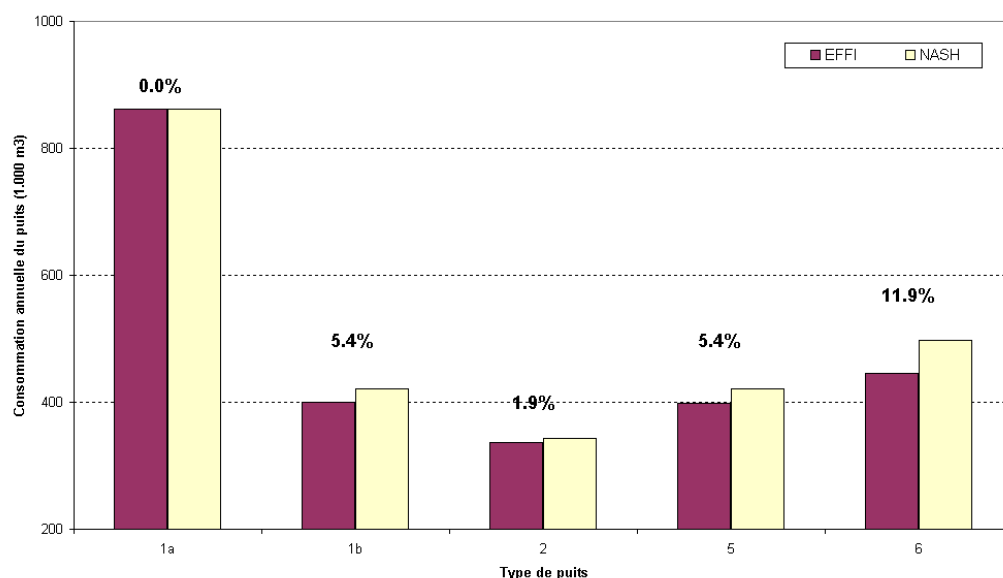


FIG. 8.2 – Comparaison des équilibres coopératif et non-coopératifs en termes de consommations en eau des puits collectifs

Mais des différences globalement faibles ... Toutefois, pour le prix de l'électricité de référence, on constate que les différences de consommation entre les deux modes sont relativement faibles (entre 0 et 12% de consommation supplémentaire annuellement).

...et variables en fonction des groupes : On constate ainsi que dans le groupe contraint par la ressource en eau (groupe 2), les possibilités de surconsommation étant faibles, il y a moins de différence de consommation entre les deux modes de fonctionnement. De même, pour les puits où la répartition des surfaces entre les producteurs est relativement homogène (groupe 5), la surconsommation y est relativement moins importante. A l'inverse, quand la ressource en eau est peu limitative et que la répartition des terres est inégale (groupe 6), les différences de consommation peuvent atteindre 12% entre les deux modes (Figure 8.2).

8.4.1.2 Les consommations individuelles

Les résultats au niveau des consommations individuelles (Figure 8.3) sont à contraster avec ceux obtenus pour l'ensemble du groupe.

Une consommation individuelle pas nécessairement moins importante en mode coopératif : Les consommations individuelles sont, en général mais pas de manière systématique, supérieures dans le cadre d'un équilibre non-coopératif que dans le cadre d'un équilibre coopératif. Il existe en effet certains cas de figure, où les producteurs consomment moins dans le cadre d'un équilibre non-coopératif.

Des écarts individuellement importants : Par ailleurs, on constate qu'une différence relativement faible au sein d'un groupe entre les deux équilibres peut cacher des grandes disparités au sein du groupe. La non-coopération au sein du puits joue donc plus en termes de répartition des consommations au sein du puits qu'en termes de consommation globale du puits.

Nous aurons l'occasion de revenir plus en détail sur les effets différenciés au niveau global contre le niveau individuel.

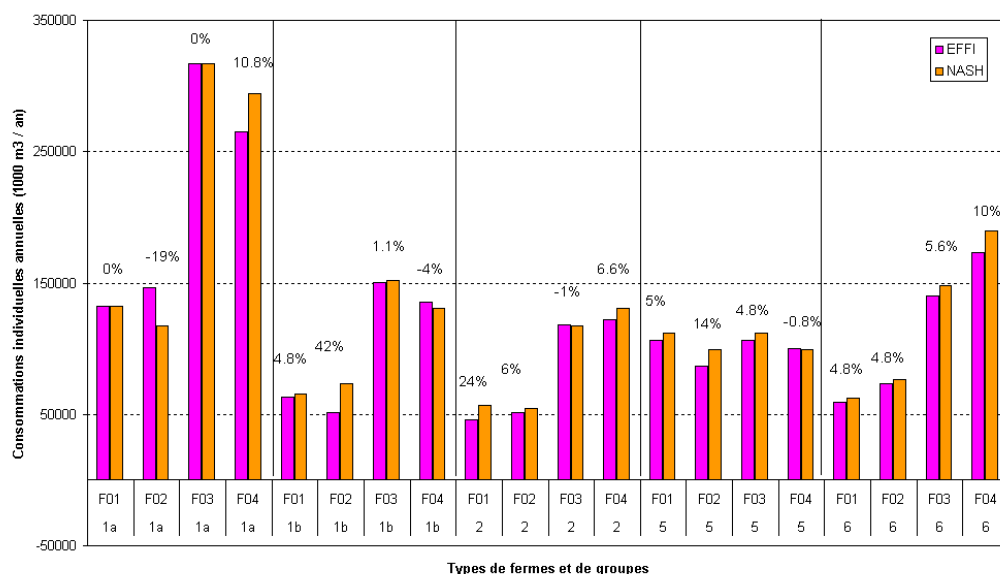


FIG. 8.3 – Comparaison des équilibres coopératif et non-coopératif en termes de consommations individuelles en eau

8.4.2 En termes de revenus agricoles des producteurs

8.4.2.1 Impact sur le revenu du groupe

Un revenu global supérieur en mode coopératif . . . En ce qui concerne le revenu agricole généré par le groupe, exception faite du groupe 1a, la non-coopération entre les membres provoque une perte de revenus pour le collectif des producteurs (Figure 8.4).

. . .mais des différences faibles On constate, à l'instar des consommations en eau, que les différences de revenus entre les deux modes sont très faibles. La non-coopération provoque une baisse globale de revenu de l'ordre de 1% du revenu des producteurs. En l'occurrence, elle n'a donc pas une influence forte sur les revenus des producteurs.

8.4.2.2 Répartition du coût de la non-coopération

Comme dans le cas des consommations en eau, les différences globales faibles cachent des disparités individuelles. La figure 8.5 qui indique les revenus agricoles par unités de surface, montre en effet des différences entre les deux équilibres pour chacune des fermes.

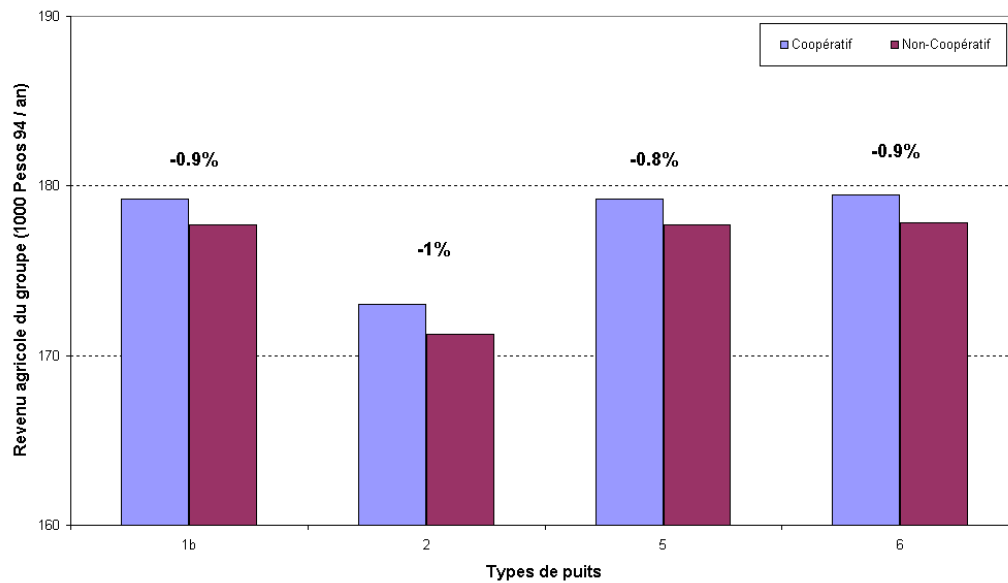


FIG. 8.4 – Comparaison des équilibres coopératif et non-coopératif en termes de revenus agricoles générés par les puits

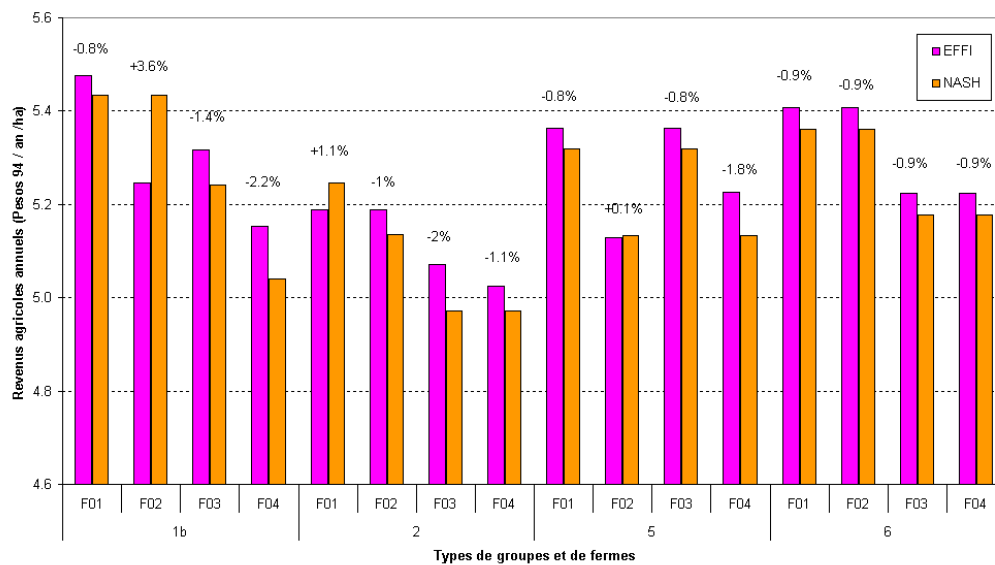


FIG. 8.5 – Comparaison des équilibres coopératif et non-coopératif en termes de revenus agricoles individuels

On constate également, sauf dans le cas du groupe 6, qu'il existe au sein des groupes des différences d'impact entre les producteurs : certains gagnent à la non-coopération alors que d'autres perdent. Toutefois, les différences de revenu, même prises individuellement, ne sont pas très importantes. Aux niveaux de tarifs actuels, les enjeux de la coopération / non-coopération sont donc relativement faibles.

8.4.3 Les instruments de la coopération

8.4.3.1 Le changement de tarification interne

La majorité des puits utilisent une clé de répartition basée sur les superficies irriguées et nous avons vu que cela pouvait engendrer une surconsommation collective, et/ou des comportements de cavalier seul. Cependant, les producteurs peuvent parfois décider collectivement un changement de l'assiette au temps d'utilisation du puits. Nous avons observé que ce type de tarification interne est de plus en plus employé par les groupes.

Si l'on suppose, sans faire trop d'erreurs, que le débit du puits et le coût d'extraction sont constants, l'indicateur temps de pompage est équivalent à un indicateur de consommation en volume. Cette nouvelle assiette annule ou réduit les interactions stratégiques entre les producteurs. Les équilibres efficients et non-efficients sont donc quasi identiques³ (nous n'avons donc pas reproduits ici les résultats des simulations!).

L'implémentation de cette tarification revient donc à atteindre un équilibre efficient. Ses effets sont donc une redistribution de l'eau et des revenus au sein du groupe. Ce changement de règles n'est donc pas neutre au sein du puits, même si son effet « vu de l'extérieur » est relativement faible pour ce qui est de la consommation en eau.

Par ailleurs, sa mise en place implique, au niveau des puits une augmentation des coûts de surveillance entre producteurs : la superficie irriguée est relativement aisée à évaluer et ne change pas souvent, un temps d'irrigation suppose un système de collecte d'information fiable et admis par tous. Le rapport coût-bénéfice, aux tarifs électriques actuels, n'est donc pas toujours

³Dans le cas de la tarification par paliers, on observe localement quelques petites différences de comportement, mais qui ne sont pas suffisamment importantes pour être significatives et mentionnées.

en faveur de cette nouvelle tarification interne.

Les gains réels d'une telle règle, mais aussi le rapport des forces au sein des puits collectifs, feront que ce type de règles sera adopté ou non. Ces deux paramètres dépendent de la configuration des puits d'une part et du coût de la ressource d'autre part⁴.

8.4.3.2 Les quotas internes

Les quotas-temps sont employés par certains groupes, et permettent de rééquilibrer les consommations sur une base acceptée par tous. Ces quotas peuvent être le résultat d'une gestion de la pénurie (quand l'eau n'est pas suffisante, on distribue de manière normative la ressource rare entre les producteurs), ou de la gestion des abus avérés de certains membres du groupe.

Ils peuvent être établis à partir des superficies irriguées (x heures de pompage par ha irrigué), ou indépendamment de celles-ci (x heures de pompage par personne et par tour). Les différences entre les deux types de tarification ne sont pas importantes pour des groupes où les superficies sont homogènes, mais deviennent importantes autrement. Le choix entre l'un ou l'autre des deux tarifications semblera là-encore dépendre d'une négociation entre les membres des groupes.

Les quotas individuels permettent de rapprocher la consommation de ce qu'elle serait dans le cadre d'un équilibre efficient (Figure 8.6 pour l'exemple du groupe 2). Il s'agit néanmoins d'une solution non-efficient car elle ne tient pas compte des efficacités relatives de chacun des producteurs. Elle a cependant le mérite de la simplicité, et est en général plus facilement mise en place et appliquée au sein des groupes.

En diminuant de manière volontaire les quotas individuels, on pourrait également obtenir des réductions de consommation en eau (Figure 8.6). Cependant, comme ces réductions engendrent une diminution globale du revenu, on perçoit mal comment cela pourrait apparaître spontanément au sein des groupes.

⁴Pour ce qui est du coût de la ressource, nous aurons un aperçu des effets différenciés en fonction des coûts en observant les courbes de demande simulées dans les sections ultérieures.

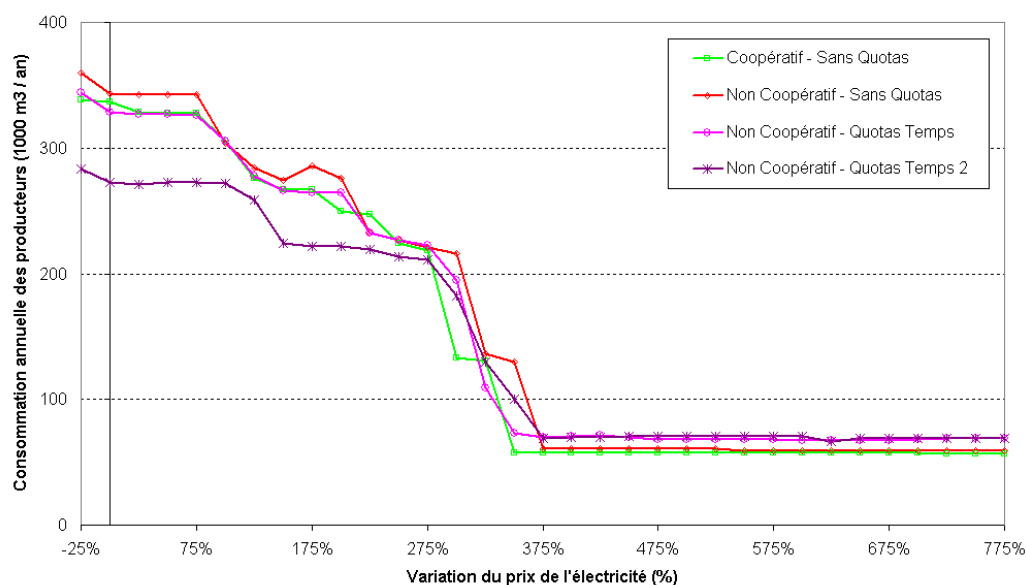


FIG. 8.6 – Demande en eau pour différents types de quotas internes (groupe 2)

8.4.4 Evaluation intermédiaire de l'impact des règles collectives

La non-coopération entre les membres d'un groupe peut engendrer une certaine surconsommation d'eau par rapport à ce qu'elle serait dans le cadre d'un équilibre coopératif. Cependant, au niveau actuel du prix de l'électricité, son impact reste limité, tant au niveau des surconsommations que des revenus.

La coopération entre les membres, ou les règles internes qui permettent de s'en approcher au sein du groupe, induit surtout un certain ré-équilibre des consommations et des revenus entre les différents membres du groupe.

Une amélioration des règles internes, sans réajustement des prix électriques, n'est donc pas de nature à changer fondamentalement les comportements de consommation des systèmes puits collectifs. Pour le politique surtout concerné par l'effet global sur la consommation en eau, un travail sur les institutions au sein des puits collectifs ne présente donc pas un intérêt majeur. Il est impératif de vérifier les interactions éventuelles de la non-coopération avec les autres instruments envisagés. C'est ce que nous ferons dans la suite de ce chapitre.

8.5 La tarification électrique

8.5.1 Courbe de demande en eau des systèmes irrigués

Dans un premier temps, on simule des augmentations successives du prix de l'électricité pour les différents groupes identifiés, dans une gamme allant de -25 à 1200% du prix de référence⁵. Ceci nous permet d'obtenir des courbes de demande en eau des différents groupes (voir figures 8.7, 8.8, 8.9, 8.10, et 8.11).

Ces courbes de demande sont présentées dans le cadre d'un équilibre coopératif (CONSO-EFFI) ou non coopératif (CONSO-NASH), pour une tarification de type uniforme. Afin de comprendre les mécanismes en place, nous avons ajouté à ces deux courbes les courbes de superficies irriguées durant le cycle d'hiver (SURF-EFFI et SURF-NASH)⁶. Les courbes horizontales 30% et 45% correspondent aux objectifs de réduction de la consommation brute de ces systèmes par rapport à leur consommation initiale⁷.

Quatre grandes phases : à l'exception du groupe 1a, que nous présenterons de manière séparée, on peut diviser l'évolution de la demande en fonction du prix de l'électricité en quatre grandes phases.

La *première phase* correspond à un plateau de consommation plus ou moins large : les systèmes sont alors très peu réactifs aux variations de prix de l'électricité tant au niveau des choix techniques que des superficies. L'augmentation du prix de l'électricité, non suivie d'ajustements de la part des producteurs, conduit donc à des pertes de revenus proportionnelles à leur consommation.

Rappelons ici que l'augmentation des prix de l'électricité depuis janvier 2002 a été de l'ordre de 40%. Certes, cette augmentation a induit une grogne importante des producteurs car affectant directement leur revenu, mais n'a donné que peu d'effets en termes de consommation des systèmes irrigués puisque dans cette gamme de changement tous les puits simulés se situaient

⁵Cette gamme de prix pourrait apparaître démesurée, mais est assez similaires aux gammes de prix rencontrées dans la littérature

⁶Les simulations montrent que les surfaces irriguées durant le cycle d'été sont constantes, et correspondent à la totalité de la sole irriguable

⁷La consommation initiale est ici la moyenne des consommations obtenues à l'équilibre coopératif et l'équilibre non-coopératif

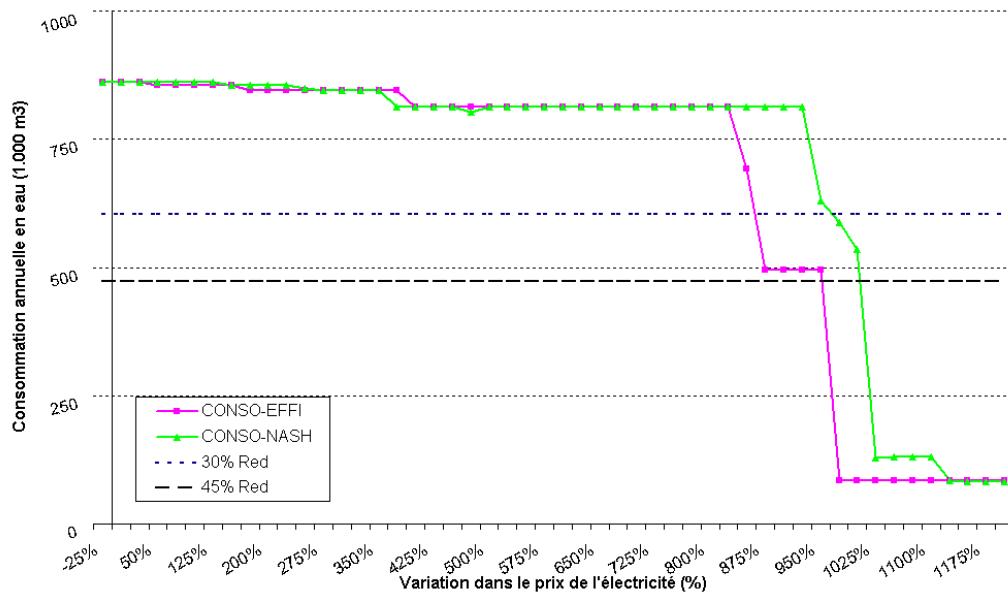


FIG. 8.7 – Courbe de demande en eau en fonction du prix de l'électricité (groupe 1a)

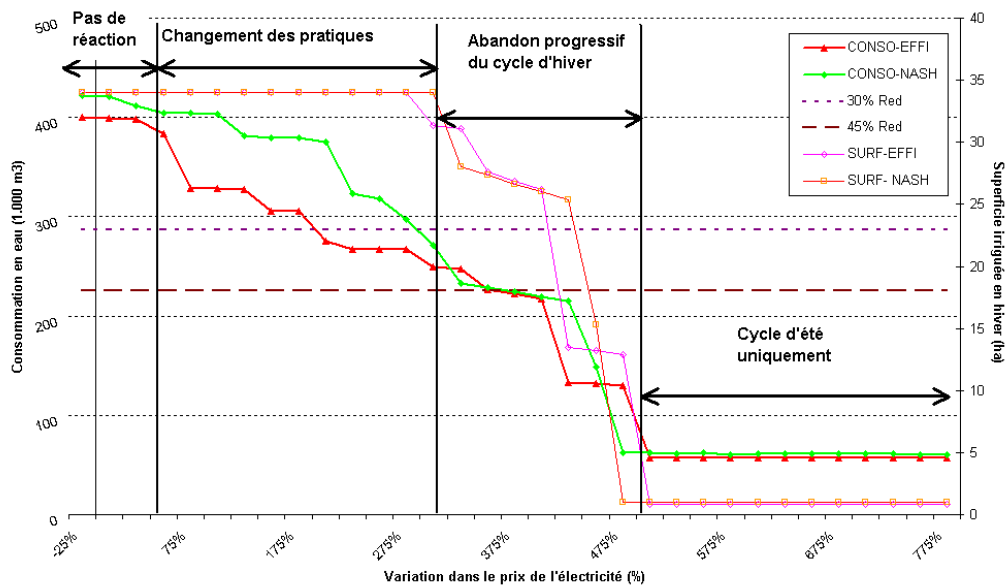


FIG. 8.8 – Courbe de demande en eau en fonction du prix de l'électricité (groupe 1b)

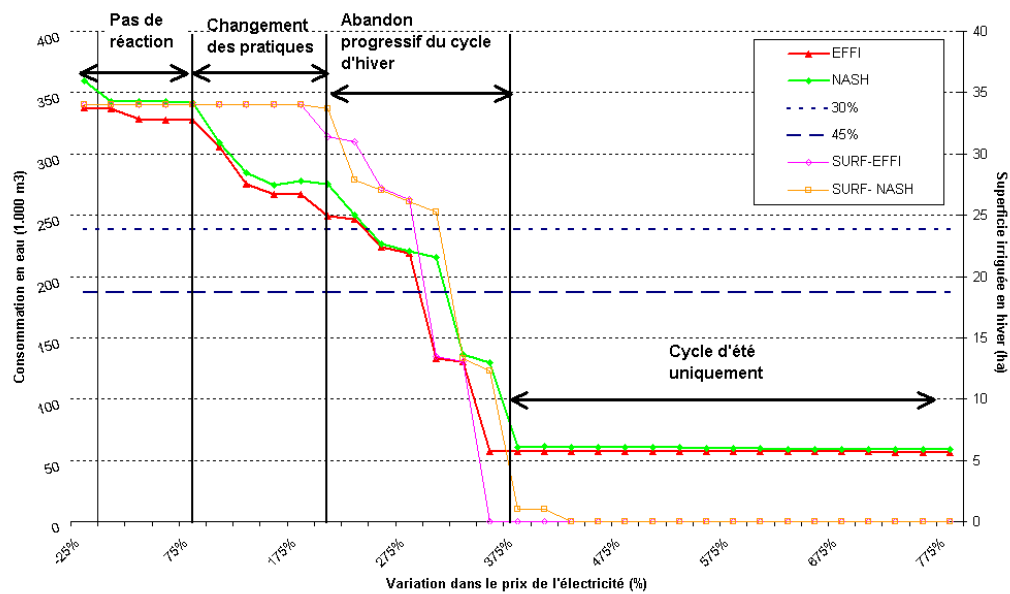


FIG. 8.9 – Courbe de demande en eau en fonction du prix de l'électricité (groupe 2)

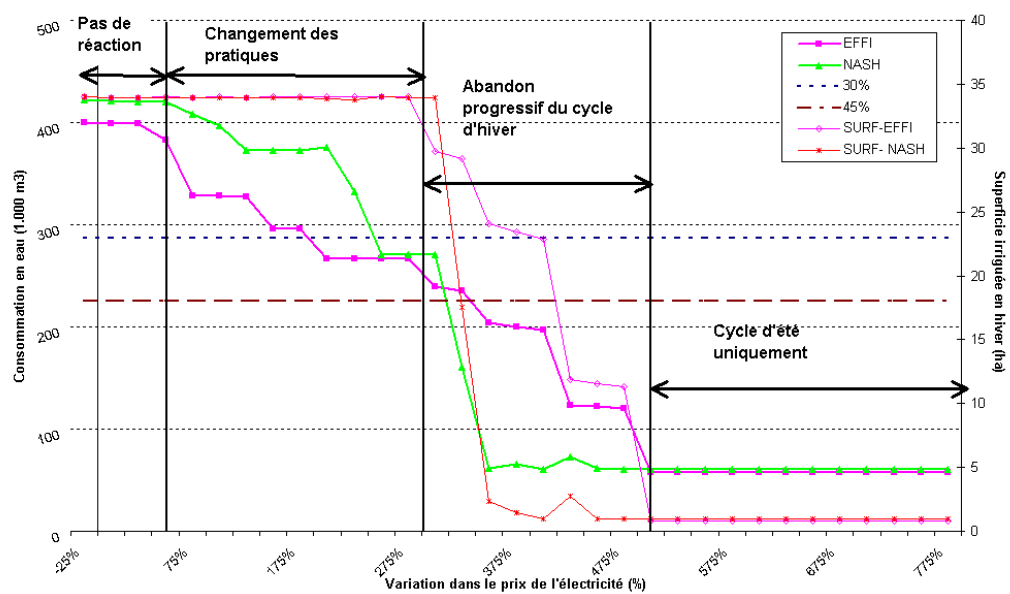


FIG. 8.10 – Courbe de demande en eau en fonction du prix de l'électricité (groupe 5)

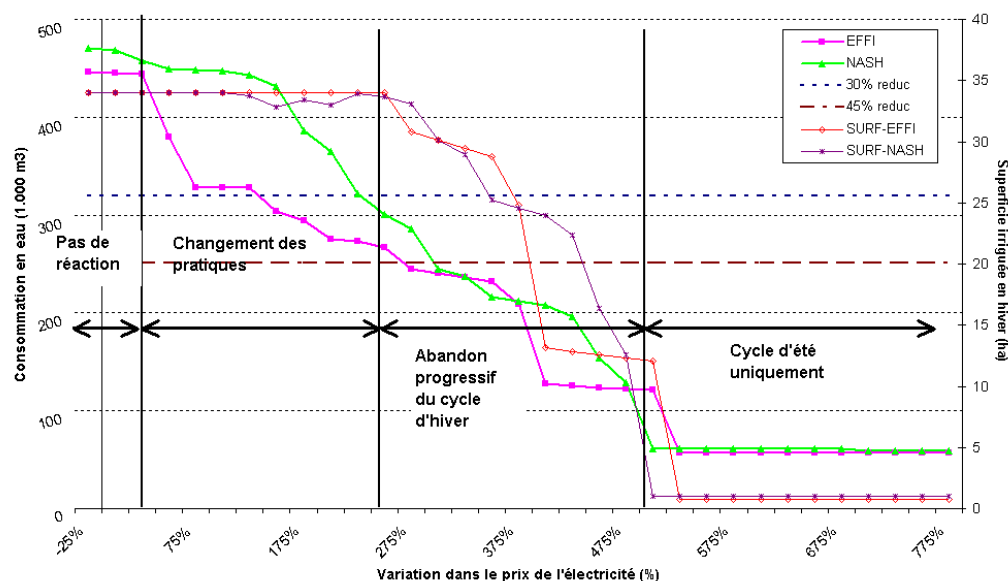


FIG. 8.11 – Courbe de demande en eau en fonction du prix de l'électricité (groupe 6)

dans ce plateau de non-réactivité.

La *deuxième phase* correspond à un ajustement des cultures et des pratiques employées par les producteurs, leur permettant de réduire leur consommation en eau sans toutefois réduire leur superficie irriguée.

La *troisième phase* correspond à une diminution plus ou moins rapide de la superficie irriguée. Cette réduction des superficies irriguées est le fait du seul cycle d'hiver. En effet, durant ce cycle on apporte selon les cultures entre trois et cinq irrigations pour une production de valeur équivalente voire inférieure à celle d'été. Durant le cycle d'été, l'irrigation vient en appoint des pluies, et donc seules une à deux irrigations sont nécessaires. La productivité partielle de l'eau durant le cycle d'hiver est donc très inférieure à celle du cycle d'été, ce qui explique un abandon plus rapide des cultures d'hiver.

La *quatrième phase*, où les producteurs ne sont plus réactifs aux variations du prix de l'électricité dans la gamme simulée, correspond à l'abandon total des cultures d'hiver pour se consacrer aux seules cultures d'été.

Cette interprétation est confortée par l'analyse de l'évolution des activités sélectionnées par les producteurs en fonction du prix de l'électricité (Figures 8.12 et 8.13) .

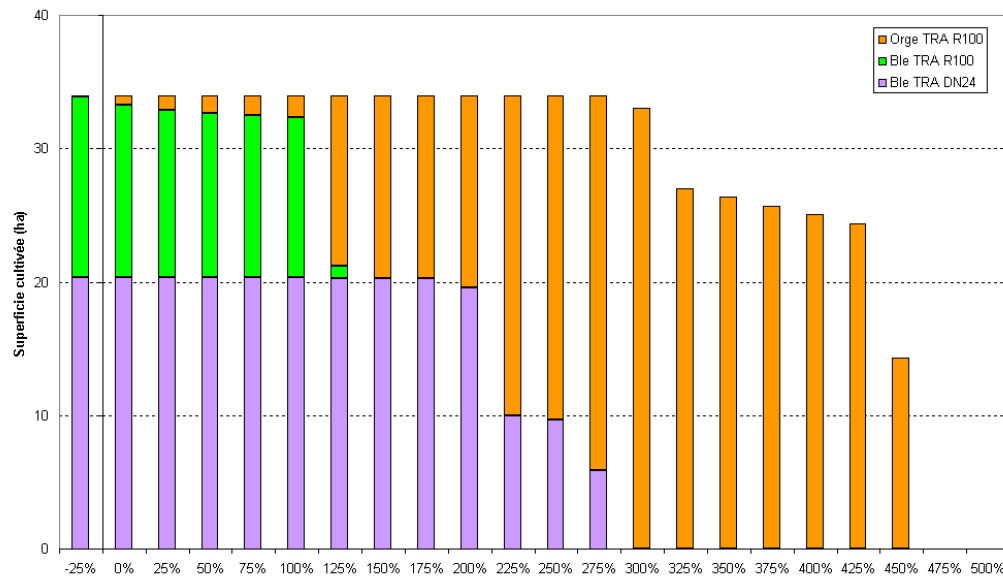


FIG. 8.12 – Evolution des superficies cultivées en hiver en fonction du prix de l'électricité (groupe 1b)

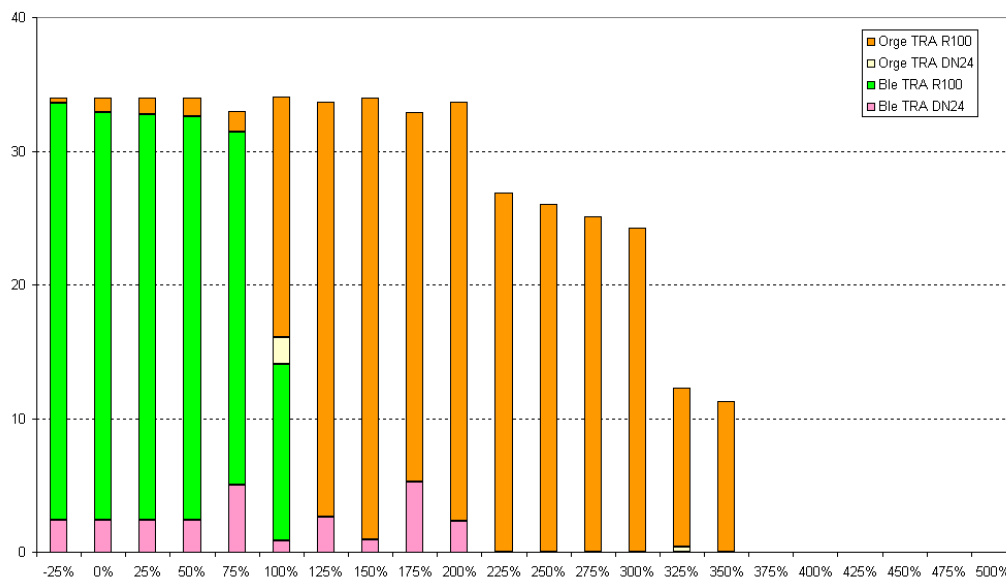


FIG. 8.13 – Evolution des superficies cultivées en hiver en fonction du prix de l'électricité (groupe 2)

Des augmentations de prix importantes avant d'obtenir une diminution de la consommation On constate ensuite que des augmentations considérables du prix de l'électricité sont nécessaires pour obtenir une réduction de la demande en eau des groupes de puits. Si on exclut les puits où les cultures fourragères sont autorisées, il faut une augmentation moyenne par rapport au prix de référence de 240% pour obtenir une diminution de 30% de la consommation, et de 325% pour une diminution de 45% (Tableau 8.2). La consommation des systèmes irrigués est donc peu élastique au prix de l'électricité. Nous retrouvons des résultats analogues à ceux trouvés dans la littérature récente sur la tarification de l'eau (Perry, 2001 ; de Fraiture et Perry, 2002).

Objectif de réduction Type équilibre	30%		45%	
	Coop	Non-Coop	Coop	Non-Coop
1b	200	300	400	325
2	250	250	300	325
5	200	250	350	325
6	250	225	275	300

TAB. 8.2 – Augmentation de prix nécessaire pour obtenir une réduction de 30% ou 45% de la consommation brute

Des différences sur la nature de la réduction de la consommation en eau : Pour la plupart des puits, une diminution de la consommation brute du puits de 30% peut être obtenue sans réduction de la superficie d'hiver. L'exception provient des puits de type 2 (très contraints en eau et avec une profondeur de la nappe importante) qui ne respectent cet objectif qu'avec une diminution des superficies irriguées durant le cycle d'hiver de l'ordre de 20% (Table 8.3). La consommation initiale de ces puits est déjà faible par rapport aux autres configurations, car du fait des coûts d'extraction plus élevés et de la contrainte plus forte sur l'eau, les producteurs ont déjà consenti à des changements de pratiques (en quelque sorte, la courbe de demande en eau est translatée vers la droite), ce qui rend toute réduction supplémentaire de la consommation par le biais des pratiques existantes difficiles.

Pour un objectif de réduction de la demande de l'ordre de 45%, tous les systèmes sont contraints de réduire leur superficie irriguée durant le cycle

Objectif de réduction	30%		45%	
Type équilibre	Coop	Non-Coop	Coop	Non-Coop
1b	0	0	-22,9	-17,6
2	-20	20,9	-60,3	-61,2
5	0	0	-29,4	-50
6	0	0	-11,8	-11,5

TAB. 8.3 – Réduction de la superficie irriguée durant le cycle d’hiver pour obtenir une réduction de 30 ou 45% de la consommation brute (en %)

d’hiver. Les puits de type 2 voient leur superficie réduite de 60%, alors que les autres puits consentent des réductions comprises entre 10 et 20%.

Des interactions fortes entre la non-coopération et la tarification :

La non-coopération entre les membres d’un puits collectif rend le système irrigué moins élastique au signal prix, surtout dans la gamme de variation de prix allant de 0 à 250%.

Les écarts de consommation en eau entre les équilibres coopératifs et non-coopératifs varient fortement avec le prix de l’électricité. Au prix de l’électricité initial et pour toute la phase I de la courbe de demande, les écarts de consommations entre les puits coopératifs et non-coopératifs sont assez faibles. Cependant, la non-coopération peut avoir deux effets négatifs. Premièrement elle peut allonger le plateau de non-réactivité du puits (cas du groupe 6 par exemple) et/ou deuxièmement elle ralentit les phénomènes d’ajustements techniques (phase II), pour les groupes 1b et 5 en particulier. Durant cette période, on observe donc des différences de demande en eau importantes entre les puits coopératifs et les puits non-coopératifs. A l’inverse, lors de la phase III de la courbe de demande, on constate que les puits non-coopératifs abandonnent plus rapidement les cultures irriguées du cycle d’hiver que les puits coopératifs. Les courbes de demande en eau des équilibres coopératifs et non coopératifs se croisent donc. Finalement lors de la phase IV (cultures d’été uniquement), la non-coopération n’a plus d’influence sur la consommation globale du puits.

Le cas particulier des puits autorisant les fourrages En ce qui concerne les puits de type 1a, nous avons une configuration de la demande particulière résultant de la possibilité de réaliser des cultures fourragères (Figure 8.7). La

demande en eau y est beaucoup plus importante car on passe d'une moyenne de 5 irrigations à 10 irrigations annuellement, ce qui implique des volumes annuels plus importants. La demande y est également beaucoup plus inélastique que pour les autres configurations. La luzerne, source principale de consommation en eau de ces puits, fournit un revenu plus important que celui des céréales. De plus, ce revenu est stable et bien réparti tout au long de l'année permettant de résoudre certains problèmes de trésorerie chez les producteurs. Il est donc difficile pour les producteurs de trouver une culture alternative ayant les mêmes caractéristiques. En conséquence, il faudrait consentir à des augmentations de l'ordre de 900% pour obtenir une réduction de la consommation des ces puits, et de 1000% pour une réduction de 45% de la demande initiale.

8.5.2 Les demandes individuelles

On peut maintenant s'intéresser aux courbes de demande individuelles des producteurs au sein des puits collectifs. On constate que la taille du système de production relative à la superficie irriguée par le groupe influence fortement les comportements de consommation en eau. On différenciera donc le comportement des producteurs en fonction de leur surface relative au sein du groupe, et s'ils sont favorisés ou non⁸.

Nous ne présenterons ici que le comportement des producteurs du groupe 1b, les phénomènes observés au niveau des autres puits étant très similaires.

Une même forme générale : Les courbes de demande individuelle présentent les mêmes caractéristiques générales que les demandes agrégées et on peut distinguer pour chacun des producteurs au sein du groupe les quatre phases identifiées précédemment (Figures 8.14 et 8.15).

Mais, des comportements « décalés » : Pour un prix de l'électricité donné, tous les producteurs ne sont pas forcément dans la même phase. Les courbes de demande sont décalées les unes par rapport aux autres et se présentent sous la forme d'escaliers emboîtés.

⁸Les puits favorisés sont ceux qui ont un indice de consommation faible

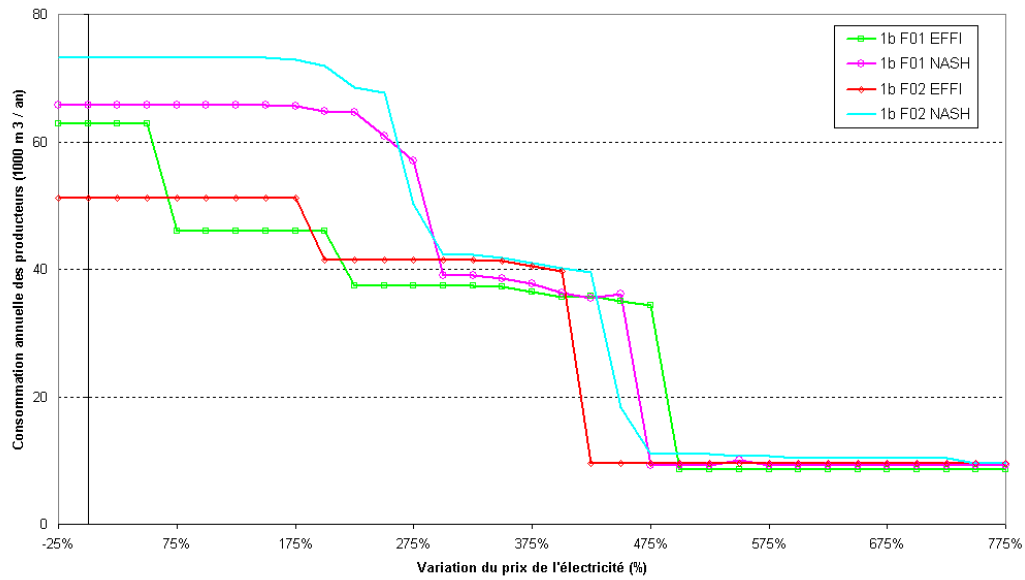


FIG. 8.14 – Demande en eau des petits producteurs au sein du groupe 1b

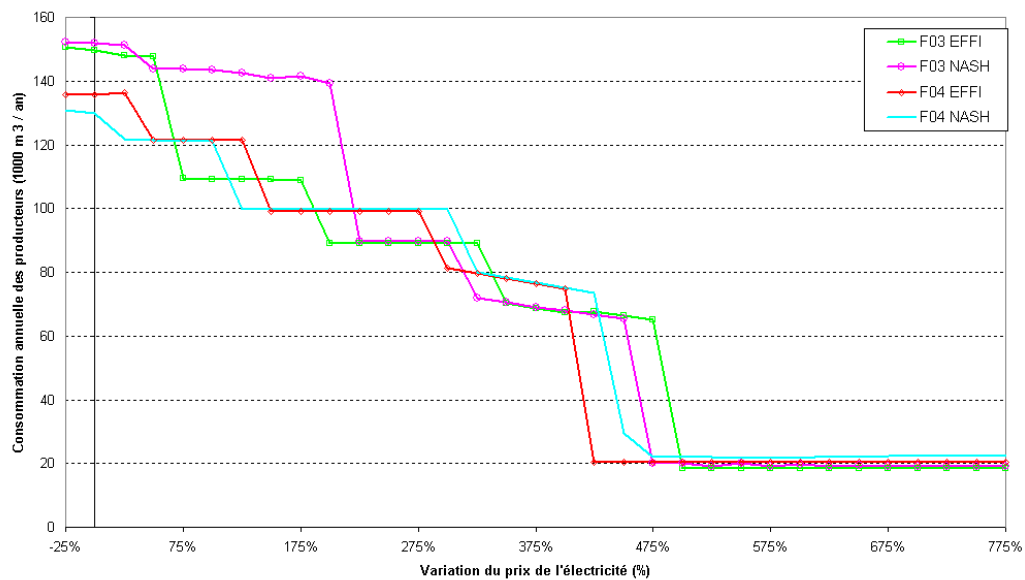


FIG. 8.15 – Demande en eau des grands producteurs au sein du groupe 1b

Ces décalages proviennent, en grande partie, de la différence dans l'indice exogène de consommation et de la taille relative au sein du groupe.

Ces décalages sont surtout importants pour les producteurs de petite taille dans le cadre d'un équilibre coopératif, et pour les producteurs de grande taille dans le cadre d'un équilibre non-coopératif.

Les mêmes effets de la non-coopération sur les phases : Les interactions entre mode de fonctionnement du puits et tarification ont les mêmes effets sur les demandes individuelles que sur la demande agrégée : la non-coopération induit un allongement de la phase I, et un rétrécissement de la phase II. Ce rétrécissement provient de l'allongement de la phase I et de l'apparition plus rapide de la phase III.

Les producteurs dans les puits non-coopératifs sont moins réactifs aux premières augmentations du prix de l'électricité, ce qui induit un retard dans l'amorce des changements de cultures et de pratiques. Quand les augmentations de prix sont plus importantes (dans la gamme 300-500%), les producteurs abandonnent les cultures irriguées plus rapidement dans un cadre non coopératif que dans un cadre coopératif. Du fait de la non-coopération, les producteurs doivent supporter des coûts individuels d'extraction plus importants, les amenant à abandonner plus rapidement le cycle d'hiver. Ces deux effets combinés font que les courbes de demande sous équilibres non-coopératifs présentent moins de paliers.

La répartition de la consommation : La répartition de la consommation : pour chaque producteur, la consommation en eau peut varier substantiellement en fonction des différentes situations d'équilibre et de sa situation au sein du groupe, ce qui influence la proportion de l'eau qu'il capture.

Dans une première interprétation égalitaire de la distribution de l'eau au sein des puits, on peut tout imaginer que chaque producteur peut prétendre à une portion d'eau égale à la proportion de superficie qu'il occupe au sein du groupe. Dans ce cadre, la comparaison entre la consommation individuelle simulée et la consommation dans un scénario égalitaire (consommation globale x superficie du producteur / superficie totale irriguée) nous donne un indicateur de sur-utilisation par rapport aux autres membres du groupe.

Pour les producteurs du puits 1b, et dans le cadre d'un équilibre non-

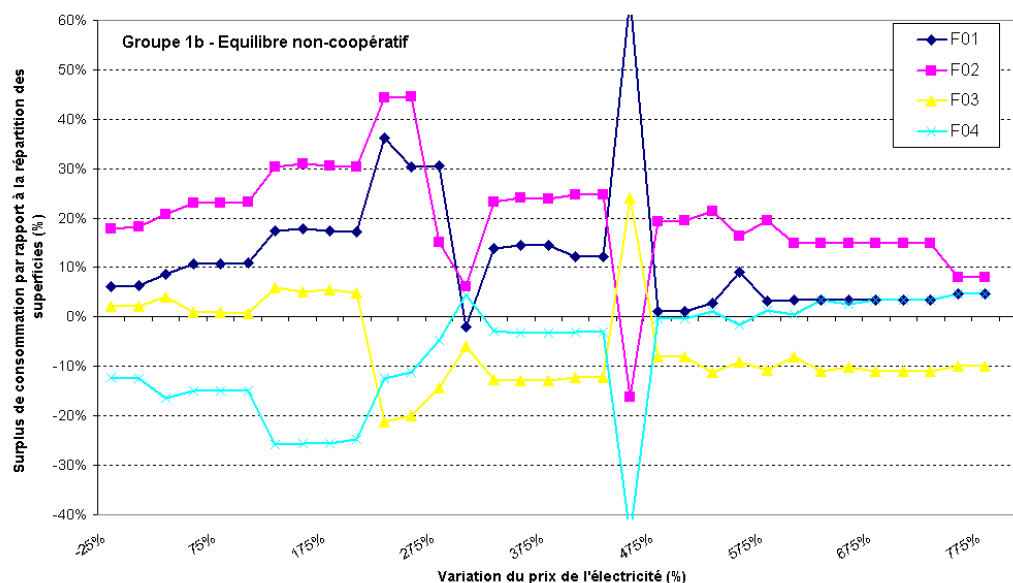


FIG. 8.16 – Surconsommation par rapport à une répartition égalitaire (équilibre non-coopératif)

coopératif, les petits producteurs capturent en moyenne 16% plus d'eau qu'ils ne le feraient en cas d'une répartition de l'eau basée sur les superficies équipées (Figure 8.16). Cette valeur moyenne, masque des surconsommations de 20 à 40% quand le prix de l'électricité augmente. Entre les deux petits producteurs, c'est le plus défavorisé qui surconsomme le plus. En revanche, pour les producteurs de plus grande taille et quand les prix de l'électricité sont bas, c'est l'inverse qui se produit. Le producteur le plus défavorisé est celui qui consomme le moins. Du fait de leur taille relative, les producteurs ont donc un comportement proche de celui qu'ils adopteraient dans un équilibre coopératif.

Dans le cadre d'un équilibre coopératif, les surconsommations ne sont plus liées aux critères de superficies relatives, mais liées essentiellement au fait qu'ils soient favorisés ou non (indice exogène de consommation). Les différences de consommation sont donc moins fortes, et les comportements des producteurs défavorisés très proches, et ce indépendamment de la répartition des superficies au sein des puits (Figure 8.17).

En résumé, pour les petits producteurs, le défavorisé prend toujours une part plus importante d'eau et abandonne moins vite les cultures irriguées

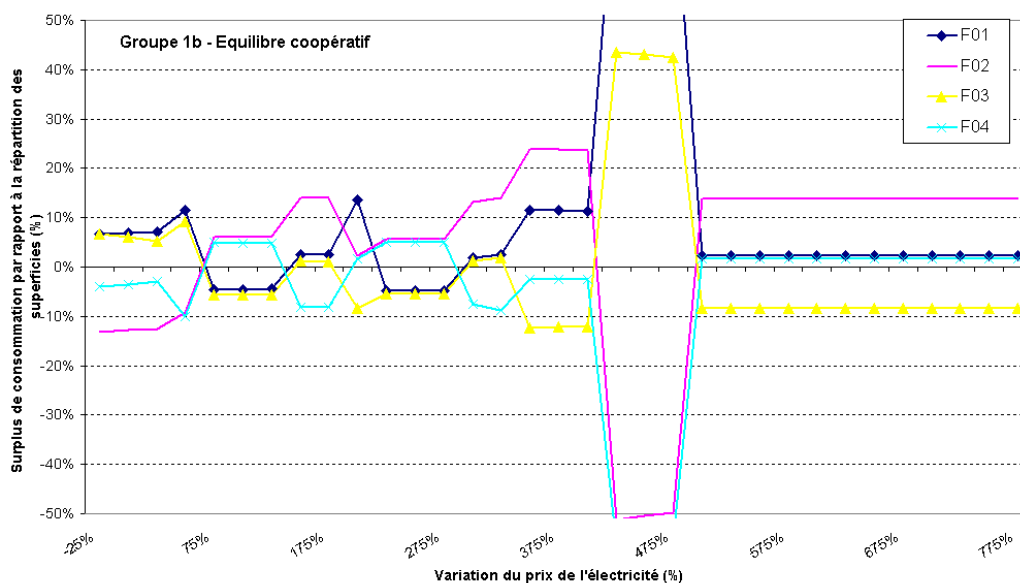


FIG. 8.17 – Surconsommation par rapport à une répartition égalitaire (équilibre coopératif)

d'hiver que son collègue favorisé. Pour les grands producteurs, contrairement au cas précédent, les défavorisés consomment en général moins que les favorisés, même si les courbes de demande sont emboîtées. On retiendra donc que les gros producteurs défavorisés ne sont pas toujours les plus gros sur-consommateurs d'eau même dans le cadre d'un équilibre non-coopératif. Notre interprétation est qu'ils ne peuvent reporter les coûts dus à leur environnement défavorable sur les autres producteurs et consomment donc moins.

Tout travail institutionnel, qui rappelons-le, aurait pour effet de se rapprocher d'un équilibre coopératif aura donc plus d'impact sur la répartition de l'eau entre les membres du groupe que sur la consommation globale du puits.

8.5.3 Effets sur les revenus agricoles agrégés

Les courbes de revenu en fonction des prix de l'électricité prennent des formes assez proches de courbes linéaires par morceaux (Figure 8.18). Les points d'inflexion de ces courbes correspondent à l'abandon définitif du cycle d'hiver. Au-delà de ce point, les systèmes utilisant moins d'eau sont donc moins affectés par les prix de l'électricité.

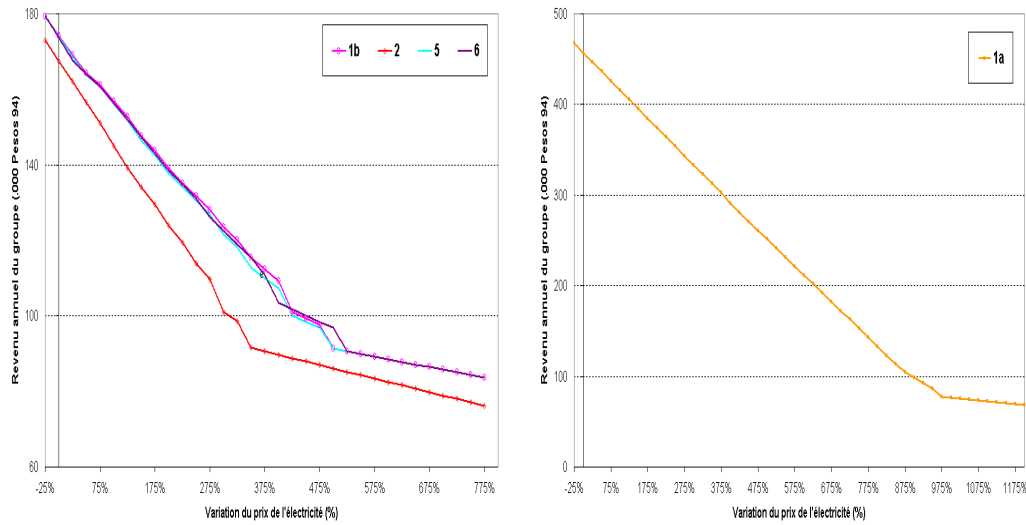


FIG. 8.18 – Impact du prix de l'électricité sur les revenus (données brutes)

La comparaison de l'effet sur le revenu entre les différents systèmes irrigués est effectuée par le biais d'un indicateur équivalent à une élasticité-arc : $\epsilon = \frac{\Delta Rev / Rev}{\Delta Prix / Prix}$ (Figure 8.19). Le facteur ϵ varie selon les groupes, en valeurs négatives, entre 0,07 et 0,14. En d'autres termes, une augmentation de 1% du prix de l'électricité engendre une perte de revenu moyenne de l'ordre 0,1%.

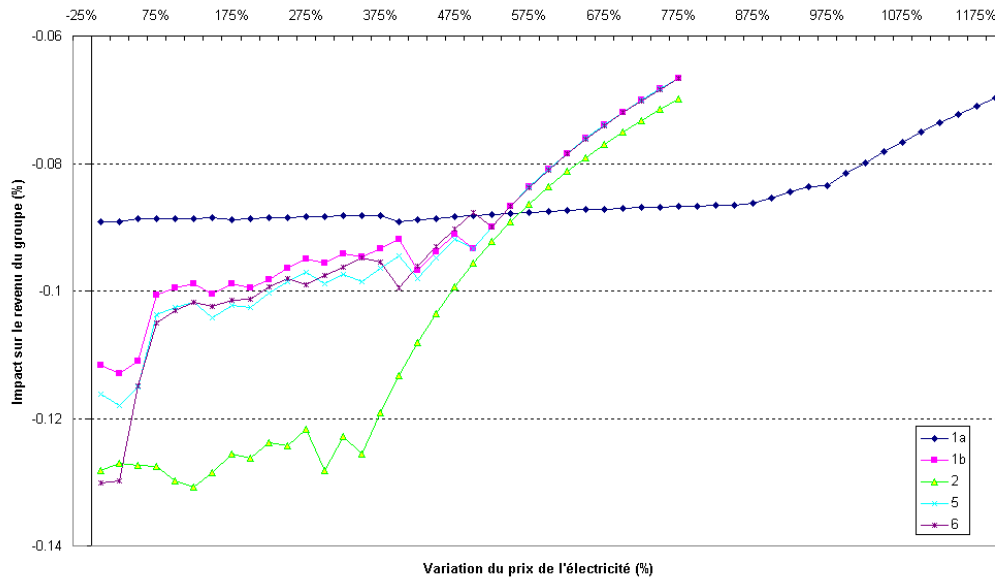


FIG. 8.19 – Impact des variations des prix de l'électricité sur les revenus (élasticité)

Néanmoins, on constate des différences en fonction des groupes concernés. Les producteurs les plus affectés en termes de pourcentage de revenu agricole sont les producteurs du groupe 2. Le niveau de la nappe étant plus profond, chaque augmentation du prix de l'électricité engendre une augmentation de coûts supérieure à celle des autres puits. On peut alors adopter deux points de vues contradictoires. Premièrement, ce sont les producteurs dont les revenus sont les plus faibles qui sont les plus affectés par la mesure. Il s'agit donc sans conteste d'un effet pervers qu'il s'agirait de corriger. A l'opposé, ce sont également les producteurs qui bénéficient de la ressource la plus dégradée qui reçoivent le signal le plus fort. Il apparaît donc juste que ce soit ces producteurs qui reçoivent le signal le plus fort.

Les producteurs du groupe 1a sont les moins affectés en termes de pourcentage de revenus. Cela provient du fait que le revenu généré par unité d'eau consommée est plus forte. Une augmentation de son coût affecte donc moins, en pourcentage, le revenu généré.

Pour atteindre des objectifs de réduction de la consommation de l'ordre de 30%, les groupes ne produisant pas de fourrages verts doivent consentir à des baisses de revenu substantielles comprises entre 20 et 30% (Tableau 8.4). Parmi ceux-ci, le groupe le plus affecté est le groupe bénéficiant de la ressource la plus dégradée (groupe 2).

Objectif de réduction	30%		45%	
Type équilibre	Coop.	Non-Coop.	Coop.	Non-Coop.
1a	-77	-85	-81	-86
1b	-20	-28	-37	-31
2	-32	-32	-40	-41
5	-21	-24	-35	-37
6	-15	-24	-27	-29

TAB. 8.4 – Impact sur le revenu (en %) d'une réduction de 30 ou 45% de la consommation brute.

Pour le groupe où la production de fourrage est autorisée, la demande en eau est très inélastique au prix de l'électricité, il faut donc augmenter considérablement le prix avant d'atteindre les objectifs fixés. Cela induit alors des effets négatifs très forts sur les producteurs (entre 70 et 90% de pertes de revenus).

La non-coopération entre les producteurs n'induit pas en moyenne d'ef-

Groupe	1a	1b	2	5	6
Variation (%)	-3,5	-1,5	-0,5	-3,1	-1,7

TAB. 8.5 – Effets moyens de la non-coopération sur les revenus des groupes

fets importants sur les revenus des producteurs (Tableau 8.5). On constate cependant, que les effets de la non-coopération sont les plus forts durant les deux périodes de transition (début des phases II et III des courbes de demande), correspondant aux deux creux des courbes présentées en figure 8.20. Durant la phase II, les groupes coopératifs amorcent une transition vers des économies en eau plus rapidement que les groupes non-coopératifs, creusant ainsi les écarts de revenu entre les deux modes. A l'inverse, durant la phase III, les groupes non-coopératifs abandonnent les cultures d'hiver avant les coopératifs, créant une perte du revenu agricole substantielle.

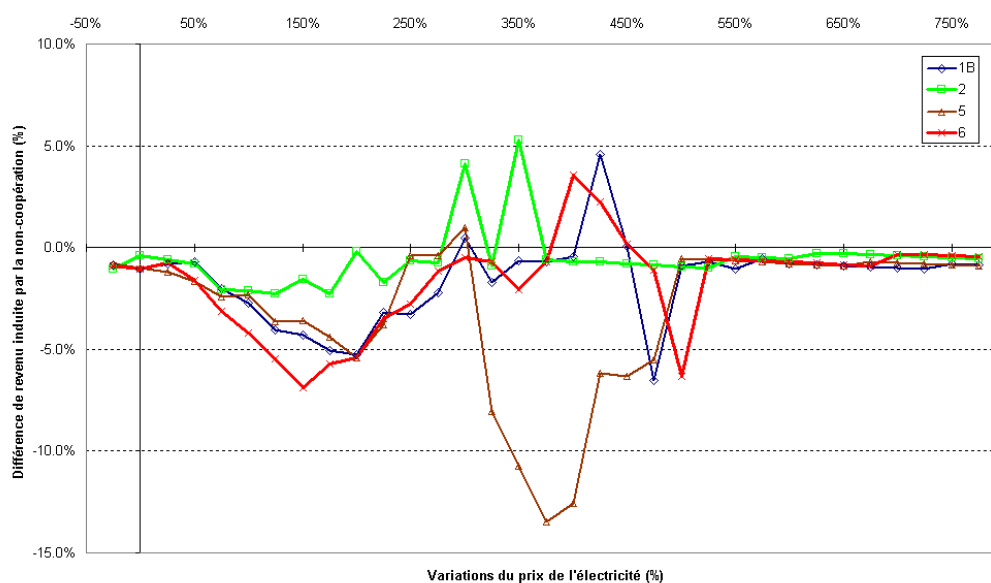


FIG. 8.20 – Effet de la non-coopération sur les revenus des groupes

8.5.4 Effet sur la productivité partielle de l'eau

Nous prendrons pour définition de la productivité partielle de l'eau, le rapport entre le revenu généré et l'eau apportée à la parcelle. Avec une telle définition, on constate que les systèmes irrigués dans les conditions actuelles ont une productivité partielle de l'eau d'irrigation assez proche (Figure 8.21).

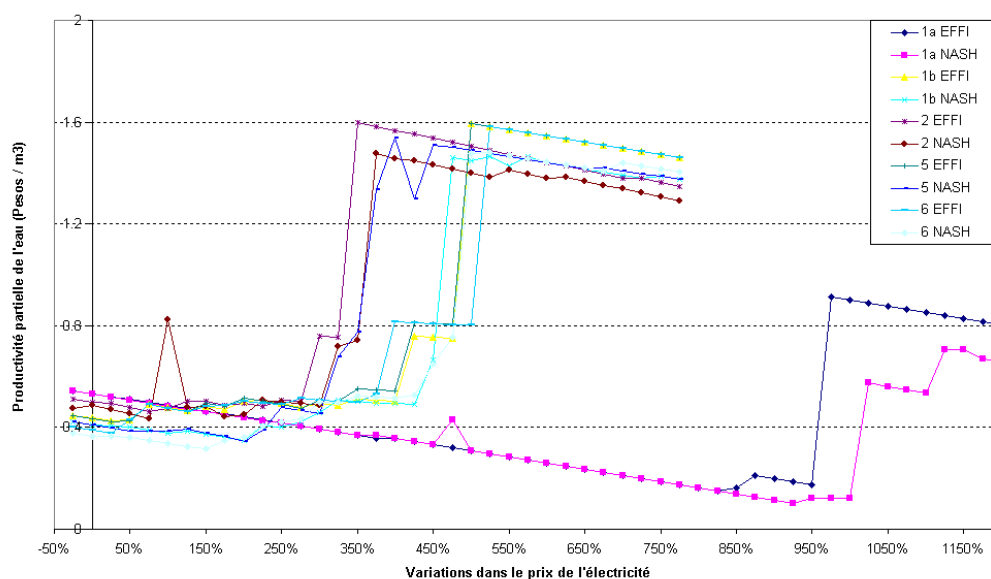


FIG. 8.21 – Productivité partielle de l'eau en fonction des groupes

Par contre, l'augmentation du coût de l'électricité induit une différenciation entre les systèmes irrigués. La productivité relative de l'eau la plus élevée est obtenue pour les systèmes ayant abandonné les cultures irriguées d'hiver. L'abandon plus ou moins rapide de ces cultures provoque un décrochement de la courbe de productivité observé pour tous les systèmes. Avant ce décrochement cependant, on constate une diminution progressive de la productivité partielle de l'eau (notamment pour les systèmes 1a, pour lesquels les fourrages sont autorisés).

8.6 Changements de type de tarification

Les résultats présentés jusqu'à présent ont été obtenus sous l'hypothèse d'une tarification uniforme : le prix de l'électricité ne dépend pas des quantités consommées. On préconise souvent des modes de tarification non-linéaires, c'est à dire croissantes avec la consommation en électricité, afin d'envoyer un signal de rareté plus fort aux plus gros consommateurs de la ressource. Dans ce cadre, nous étudierons la tarification par paliers, telle qu'elle est utilisée à l'heure actuelle. Par ailleurs, nous étudierons un type de tarification peu rencontrée dans la gestion de la demande en eau, aux caractéristiques

originales, la tarification uniforme avec remise fixe.

8.6.1 La tarification par paliers

8.6.1.1 Effets directs

Deux structures de tarification par paliers ont été simulées (Tableau 8.6). Le type 1 correspond à la structure de prix actuellement pratiquée, tant au niveau des bornes des paliers que des prix pratiqués à chaque palier. Le type 2 correspond à une tarification où l'amplitude du deuxième palier serait allongée, les prix pratiqués étant les mêmes.

Les courbes de demandes en fonction des augmentations de prix simulées pour ces deux structures tarifaires sont présentées, et comparées avec la tarification uniforme pour les groupes 1a, 1b et 2⁹ (Figures 8.22, 8.23 et 8.24).

Palier ^a	Type 1	Type 2	Prix du kWh
1	0-5.000	0-5.000	0,22
2	5.000-15.000	5.000-10.000	0,26
3	15.000-35.000	10.000-35.000	0,29
4	>35.000	>35.000	0,32

^aLire : pour une consommation comprise entre 0 et 5.000 kW, le prix du kW est de 0,22 Pesos/kW

TAB. 8.6 – Les différents paliers simulés de la tarification par paliers

Au niveau initial des prix, l'introduction de paliers ne remet pas fondamentalement en cause la structure de la consommation des différents types de systèmes irrigués. L'introduction de non-linéarité, telle qu'elle est prévue, ne permet donc pas une réduction sensible de la consommation et ne pénalise pas vraiment les revenus des producteurs.

Quand on observe l'évolution de la demande en fonction des prix, on constate que l'impact de la tarification par paliers croisée varie en fonction des groupes.

L'impact le plus marqué est observé sur les puits où la consommation est actuellement importante (groupe 1a). Dans ce cas, la courbe de demande est ramenée vers la droite, diminuant ainsi le seuil de réactivité du groupe

⁹Pour ne pas surcharger l'exposé, nous n'avons pas présenté les courbes des groupes 5 et 6, les effets constatés étant les mêmes.

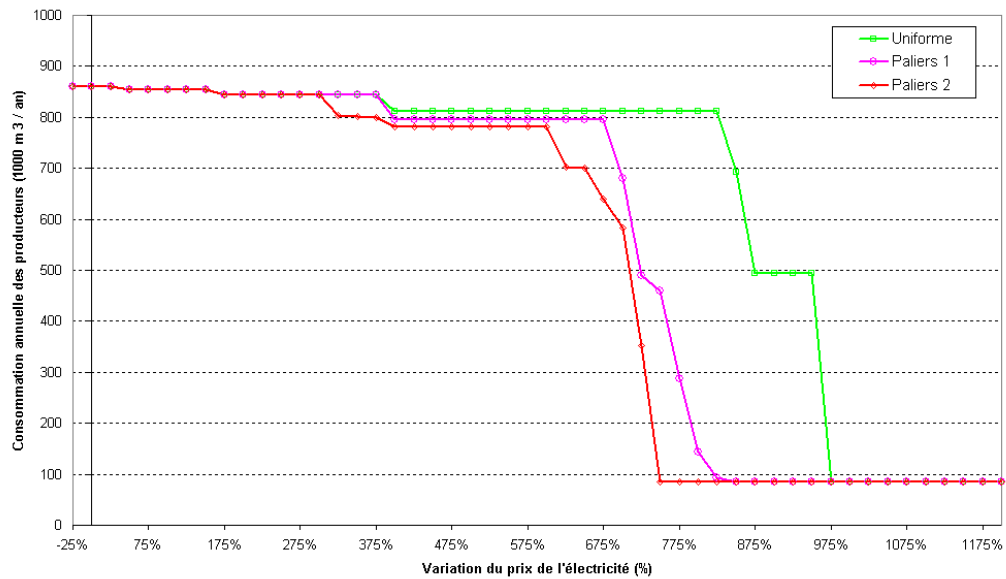


FIG. 8.22 – Courbe de demande avec tarification par paliers (groupe 1a)

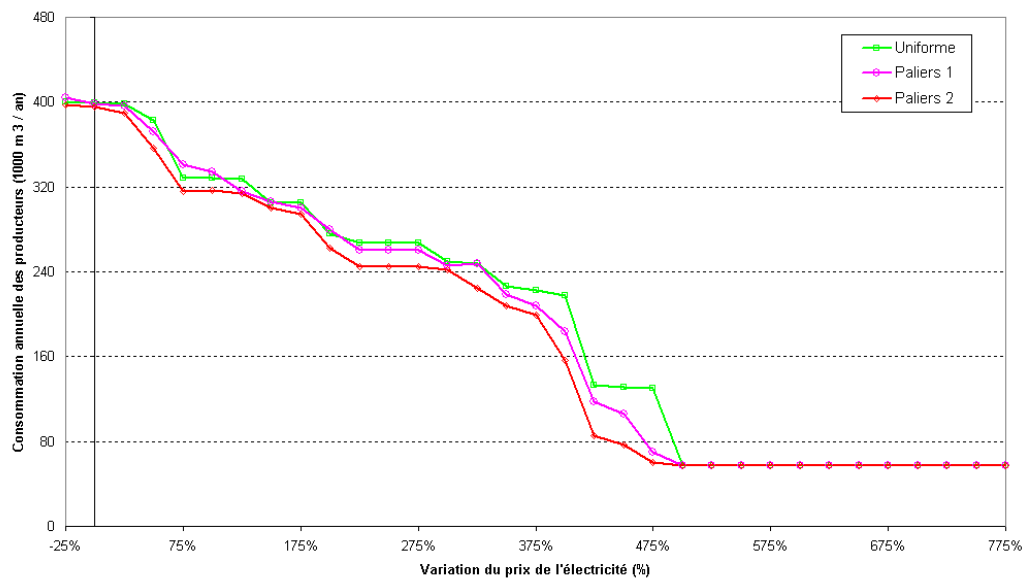


FIG. 8.23 – Courbe de demande avec tarification par paliers (groupe 1b)

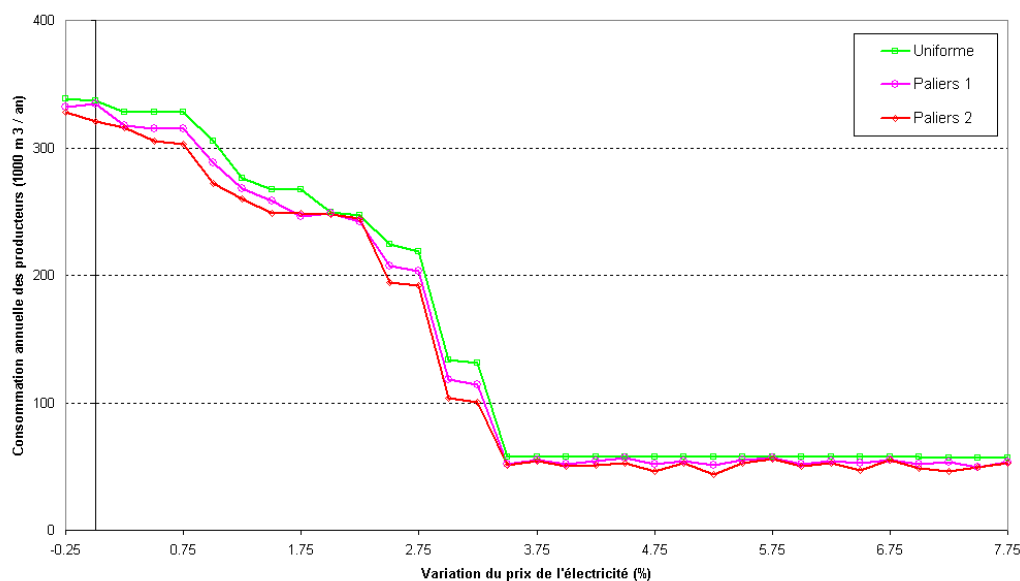


FIG. 8.24 – Courbe de demande avec tarification par paliers (groupe 2)

aux augmentations de prix. Les augmentations nécessaires pour diminuer la consommation de ces systèmes restent cependant très importantes.

Pour les autres groupes, l'introduction de paliers n'a qu'une influence marginale sur les comportements de production et leurs prélèvements en eau. On constate cependant, que la tarification rend ces groupes légèrement plus élastiques au signal prix. C'est normal si l'on considère que, pour les puits considérés, tous les producteurs consomment à chaque période des quantités de l'ordre de 30 à 35.000 kW par mois. Les producteurs, restant plus ou moins dans un même palier, ne sentent donc pas les effets des paliers.

L'introduction de la tarification par paliers, telle qu'elle est développée à l'heure actuelle, n'a qu'un impact relativement limité sur la demande globale en eau des puits collectifs. Pour avoir un impact plus important, il faudrait éventuellement revoir la courbe de progression des prix en fonction des consommations (« marches d'escaliers plus grandes »).

8.6.1.2 Application pratique

La tarification par paliers est actuellement en place pour l'électricité agricole au Mexique. Au niveau actuel des prix et avec la progressivité actuelle, nous n'avons pas constaté d'impact réel d'une telle mesure.

Pour être efficace, on doit appliquer une augmentation forte des prix de l'électricité. On engendre alors une ponction importante sur le secteur agricole. On rencontre donc les mêmes problèmes de faisabilité politique que pour la tarification uniforme.

Par ailleurs, la tarification par paliers risque d'être peu « lisible » par les producteurs. En effet, les enquêtes auprès des producteurs montrent que le mode de calcul de la facture reste une énigme pour nombre d'entre eux. Le nouveau signal prix risque donc de ne pas être compris.

8.6.2 La tarification uniforme avec remise fixe

8.6.2.1 Effets directs de la tarification

Comme nous l'avions évoqué précédemment, la tarification uniforme avec remise fixe consiste à faire payer les consommateurs au prorata direct de leur consommation, mais également à leur octroyer une subvention sous forme de remise fixe sur la facture d'électricité. Nous tenterons d'en voir l'intérêt et les limites. Dans notre cas de figure, et pour simplifier les procédures administratives, cette subvention serait proportionnelle aux superficies équipées.

Les simulations effectuées montrent tout d'abord que la remise fixe mensuelle permet de desserrer les contraintes de trésorerie pour les producteurs qui n'ont qu'un accès limité au crédit. Elle induit donc ponctuellement des augmentations, généralement modérées, de la consommation en eau du puits (Figure 8.25). Logiquement, ce phénomène est d'autant plus marqué que le prix de l'électricité est élevé.

Mais du fait des appuis directs aux revenus des producteurs par le biais de la remise fixe, on pourra comparer les instruments à des tarifs électriques différents. A titre d'exemple, nous traiterons le cas du groupe 1b, dans le cadre d'un équilibre non-coopératif. Nous avons vu qu'il fallait augmenter les tarifs électriques de 280% pour réduire leur consommation de 30%. On obtient le même résultat dans le cadre de la tarification uniforme avec une remise de 300 Pesos par ha et par période d'irrigation. La remise ne provoque pas d'effets indésirés sur la consommation en eau. En revanche, cette remise permet d'annuler les pertes de revenus des producteurs engendrées par l'augmentation des tarifs (Comparaison des points A et C sur la figure 8.26).

La remise fixe annule l'impact négatif de la tarification sur les revenus

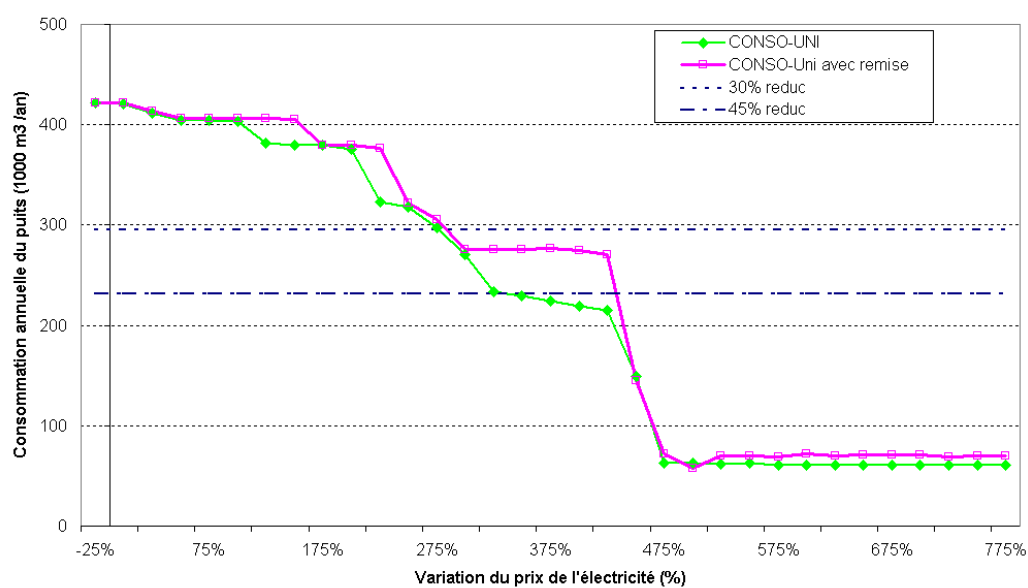


FIG. 8.25 – Effet de la tarification uniforme avec remise sur la consommation (groupe 1b)

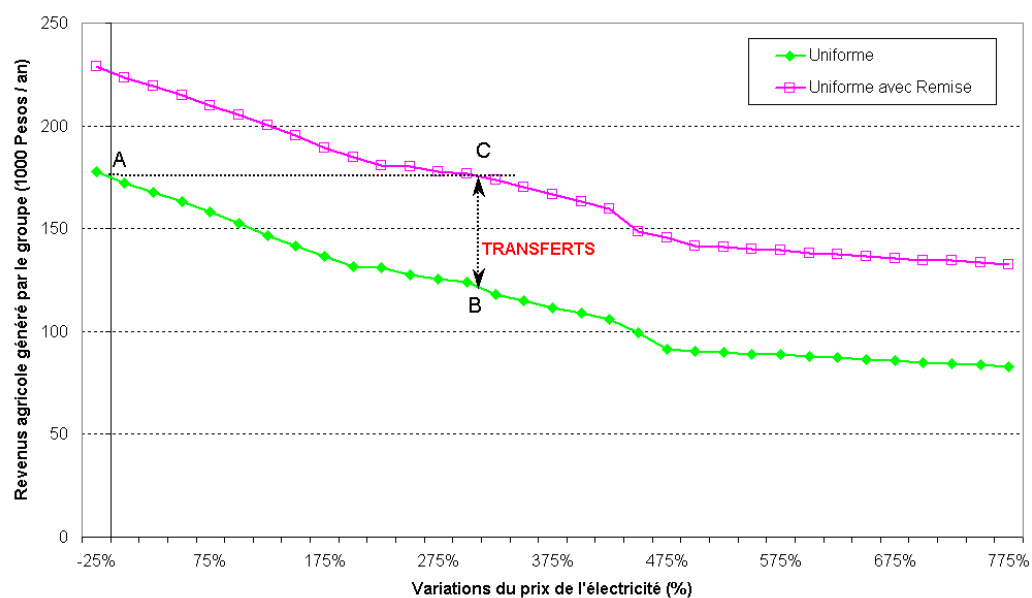


FIG. 8.26 – Illustration du rétro-transfert de revenu par l'octroi d'une remise fixe

des producteurs. Elle permet donc d'envisager des augmentations de tarifs électriques substantielles, c'est à dire dans des proportions qui permettront d'induire une réduction de la consommation en eau sans toutefois ponctionner outre mesure le secteur agricole. Elle encourage des économies par l'agriculture, sans toutefois faire payer le prix de ces économies par le secteur.

Pour la négociation de la tarification, elle devrait donc être plus facilement admise par les acteurs du secteur agricole.

8.6.2.2 Un instrument de transfert ?

Si on travaille à budget constant, ce type de tarification effectue surtout un transfert des plus gros consommateurs vers les moins gros consommateurs en eau. Dans son fonctionnement, ce type de tarification s'approche du système des « *feebates*¹⁰ » selon le terme anglo-saxon, et que l'on traduira par le terme « redevance - appât ». Les *feebates* sont souvent préconisés dans le domaine des émissions polluantes. Par exemple, dans le cas des pollutions engendrées par le trafic routier, dans certains pays, les véhicules ayant une consommation de carburant plus élevée qu'une moyenne prédéfinie sont soumis à une taxe à l'achat, proportionnelle au surcroît de consommation, taxe dont le produit sert à subventionner les acheteurs de véhicules dont la consommation est plus faible que la moyenne. Comme son principe est de fonctionner à *recette globale constante* pour les finances publiques, il équivaut à un transfert des pollueurs vers les citoyens respectueux de l'environnement. Dans les faits, l'application du système des *feebates* pour la taxe à l'achat revient à diminuer les taux de taxes pour les véhicules propres et à les augmenter pour les véhicules sales, avec un point neutre qui s'abaisse automatiquement au fur et à mesure que les ventes (ou que le parc) s'oriente vers des véhicules plus propres (Darbera, 2000).

Appliqué à notre domaine de l'eau, dans un monde idéal, pour une remise fixe donnée associée avec un niveau de tarification, certains producteurs devraient donc voir leur revenus augmenter, alors que d'autres devraient voir leurs revenus diminuer. Nous développerons plus amplement cette idée dans le chapitre suivant.

¹⁰Contraction des termes *fee* : redevance et *rebate* : remise

8.6.2.3 Application pratique et dangers potentiels ?

La tarification uniforme avec remise fixe, on le voit, permettrait d'amener les producteurs à changer les comportements de consommation, sans toutefois pénaliser outre-mesure leurs revenus. Elle permet de transmettre un signal plus fort aux gros consommateurs qu'aux petits consommateurs. Elle présente donc beaucoup d'avantages sur la tarification uniforme simple. Cependant, son application pratique pourrait poser un certain nombre de problèmes.

Premièrement, cela suppose que le principe soit *connu et compris* de tous les producteurs. Le niveau d'éducation moyen des producteurs de la région est très bas, beaucoup des producteurs que nous avons rencontrés ayant par exemple des difficultés à lire et à écrire. Les producteurs ont donc tendance à regarder la facture finale sans forcément comprendre sa construction. Sans pédagogie appropriée, le producteur risque donc d'être désorienté par ce système tarifaire.

Deuxièmement, elle suppose une gestion administrative supplémentaire pour l'organisation des transferts monétaires vers les producteurs. Cependant, on pourrait imaginer que les transferts pourraient s'opérer via l'opérateur public d'électricité, pour lequel le coût marginal de gestion d'une telle opération serait le plus faible¹¹.

Finalement, subsiste le danger que le gouvernement ne succombe à l'irrésistible tentation d'utiliser des fonds facilement collectés pour d'autres usages « urgents » que ceux auxquels ils sont initialement destinés¹² !

8.7 Les quotas électriques

Lorsqu'il faut mettre en œuvre des politiques de l'environnement, on rencontre deux conceptions des politiques souvent opposées, mais qui peuvent être complémentaires. La première conception préconise l'utilisation des instruments économiques que nous avons développés antérieurement : tarifications, taxes, subventions. La deuxième conception propose des politiques

¹¹Il supposerait une meilleure coordination et des échanges d'information entre deux entités para-gouvernementales que sont la commission nationale de l'eau qui détient l'information sur les droits d'extractions et les superficies irrigables, et la commission fédérale de l'électricité qui distribue l'électricité

¹²Toute ressemblance avec des faits réels serait elle à exclure ici !

reposant sur les réglementations de type administratif, telles que les permis, les normes et les quotas. C'est cette dernière que nous analysons maintenant.

Nous pourrions envisager deux types d'instruments réglementaires. Le premier instrument, d'ailleurs déjà en place, consiste à donner des quotas d'extraction à ne pas dépasser. Au droit d'extraction donné aux producteurs, s'ajoute le devoir de ne pas dépasser une limite annuelle déterminée par l'administration. Dans notre cas d'étude, ce type d'instrument a déjà montré son inefficacité essentiellement parce que l'administration distribue des quotas sans se donner les moyens administratifs, par exemple par la présence effective de contrôleurs, de vérifier le respect de ces limites par les utilisateurs. Par ailleurs, la présence de contrôleurs ne serait pas forcément la solution. La délégation de pouvoir de contrôle à des fonctionnaires aux pouvoirs discrétionnaires peut, en effet, engendrer un phénomène de corruption : les pouvoirs du fonctionnaire servant en premier lieu ses intérêts personnels avant ceux fixés par le gouvernement qui le paie. Il faudrait alors étudier les incitations à mettre en place pour éviter ce phénomène de corruption (voir par exemple, Damania, 2002). Pour intéressante qu'est la question, nous nous écarterions du sujet que nous nous étions fixé.

Le deuxième instrument que nous proposons d'étudier ici, consiste à limiter techniquement la consommation des puits électriques en diminuant la disponibilité journalière d'électricité pour les puits collectifs. C'est une solution techniquement faisable puisque les puits sont alimentés par un réseau électrique et des compteurs indépendants de ceux des particuliers. C'est également une solution *a priori* peu coûteuse et ne nécessitant la mise en place d'un système de contrôle dont les problèmes ont été soulevés précédemment.

Cette deuxième solution bien que ressemblante à la première ne lui est pas tout à fait identique. Cette dernière enlève effectivement une certaine flexibilité aux producteurs puisqu'elle serre la contrainte de disponibilité de manière quotidienne, alors que l'autre est annuelle.

Pour suivre notre objectif de réduction de la consommation de l'ordre de 30%, nous avons donc étudié la réduction du temps d'alimentation électrique du même ordre. Autrement dit, nous avons simulé une situation où les puits ne recevraient de l'électricité que 16 heures par jour. On resserre ainsi la contrainte de disponibilité en eau sans augmenter les coûts d'extraction.

8.7.1 Effets sur la consommation en eau

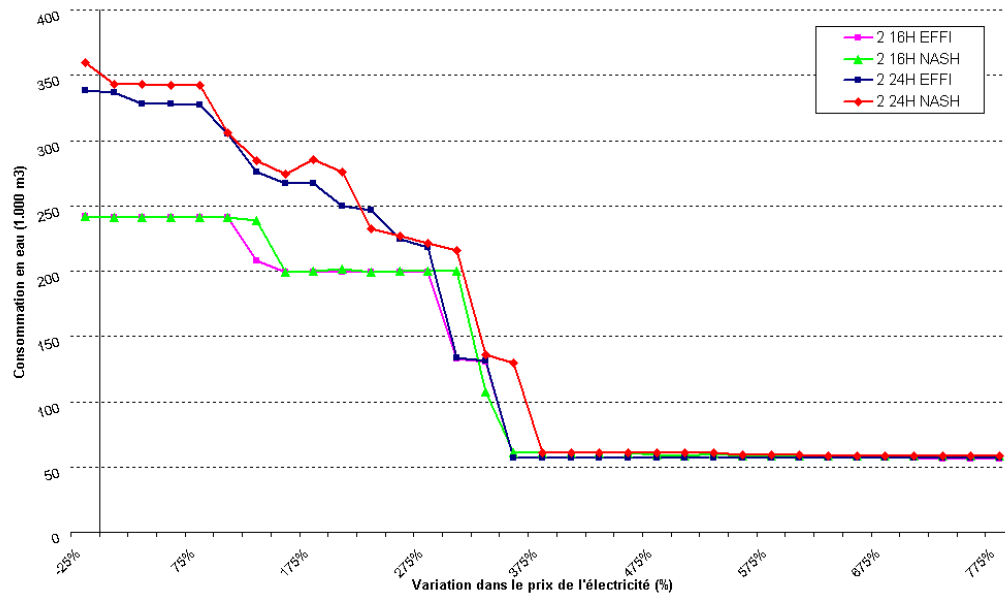


FIG. 8.27 – Effet des quotas d'électricité sur la consommation en eau (groupe 2)

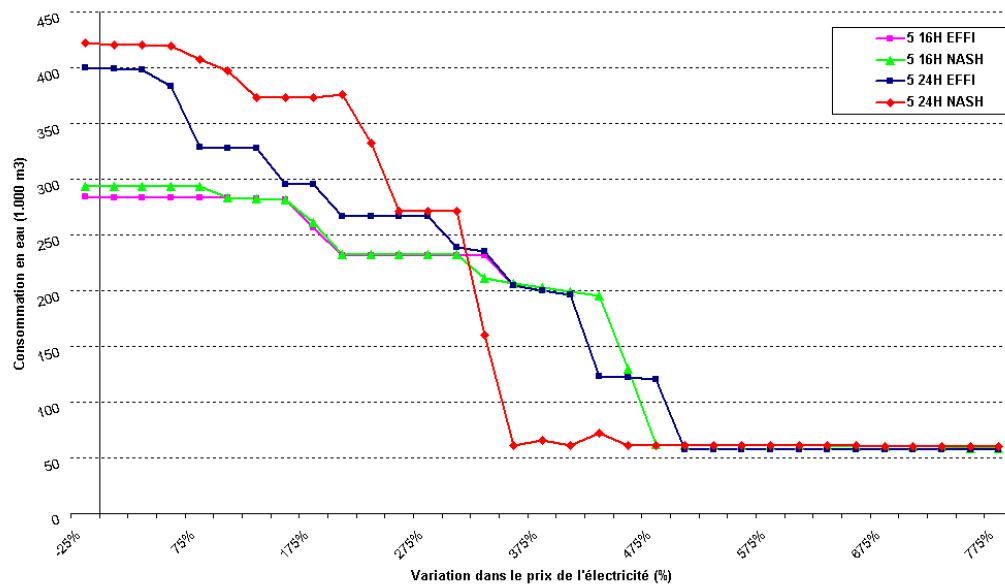


FIG. 8.28 – Effet des quotas d'électricité sur la consommation en eau (groupe 5)

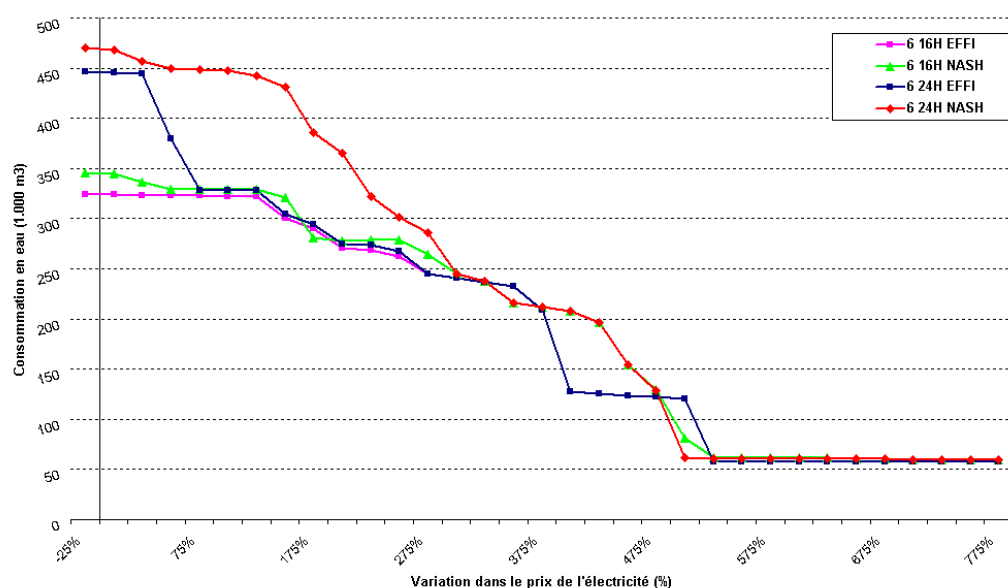


FIG. 8.29 – Effet des quotas d'électricité sur la consommation en eau (groupe 6)

La limitation de l'accès à l'électricité produit la réduction de consommation attendue.

Quand on étudie la réponse de la demande en eau au prix de l'électricité dans ce nouveau contexte, on constate que les différentes phases des courbes de demande sont encore présentes, mais que la phase I (période de non réactivité au prix) se trouve allongée. La courbe de demande est tronquée par la contrainte globale en eau. On retrouve ici le phénomène décrit par d'autres auteurs pour expliquer l'inélasticité de la demande en eau au prix (de Fraiture et Perry, 2002).

On constate également que l'imposition de quota rapproche les courbes de demande des équilibres coopératifs et non-coopératifs. Le caractère coopératif ou non du puits n'a donc qu'une incidence marginale sur la consommation globale du puits.

Quand la contrainte de disponibilité en eau n'est plus contraignante, le comportement des producteurs est assez proche des conditions observées sans quotas. La différence de comportement doit s'expliquer par le coût d'opportunité de l'eau différent du fait des contraintes en jeu.

8.7.2 Effets sur les revenus

L'impact sur les revenus est présenté dans le tableau 8.7. Nous y avons ajouté, pour mémoire, les impacts sur les revenus que nous avons obtenus pour une réduction de 30% de la consommation en eau au moyen du seul instrument tarifaire.

	1a	1b	2	5	6
Impact sur la consommation en eau	-33	-29	-28	-29	-27
Impact quota sur le revenu	-27	-6	-11	-6	-1
Impact prix sur le revenu	-77	-20	-32	-21	-15

TAB. 8.7 – Impact des quotas électriques sur les revenus des producteurs

Sans être négligeable l'impact des quotas sur les revenus est beaucoup plus faible que celui de l'instrument tarifaire. Les producteurs seraient donc moins affectés par une réduction de la disponibilité en électricité que par une augmentation tarifaire.

Ces impacts varient également en fonction des configurations des puits. Les producteurs groupe 6 par exemple, disposant initialement d'une quantité importante d'eau ne sont que très peu affectés par l'imposition d'un quota.

A l'inverse, les groupes déjà contraints par l'eau avant l'imposition de quotas, sont plus affectés par la mesure.

Finalement, pour le groupe 1a dont la demande était très inélastique au signal prix, l'instrument quota bien qu'affectant sérieusement le revenu des producteurs a également un impact beaucoup plus faible sur les revenus.

8.7.3 Effets sur la productivité partielle de l'eau

La raréfaction de la ressource en eau conduit les producteurs à améliorer de manière substantielle la productivité partielle de l'eau 8.8.

	1a	1b	2	5	6
Variation (%)	10	31	24	32	36

TAB. 8.8 – Variation de la productivité partielle de l'eau suite à la diminution de la disponibilité en électricité de 30%

8.7.4 Application pratique et dangers potentiels

L'application pratique de quotas est relativement simple à mettre en place et conduit directement à une réduction de la consommation souhaitée. C'est une méthode qui présente donc un maximum de garantie quant au résultat final.

Pour une réduction donnée de la disponibilité en électricité, elle introduit une légère distorsion entre les groupes du point de vue de la consommation, certains réduisant plus fortement que d'autres leurs consommations, que nous pouvons relier aux capacités actuelles de pompage (débit des pompes).

Elle est facilement interprétable par les producteurs qui en perçoivent immédiatement les effets. De ce point de vue, elle est donc sûrement plus facilement négociable entre l'Etat et les producteurs.

De plus, cette mesure affecte beaucoup moins le revenu agricole des producteurs que la tarification électrique (au moins dans le cas d'une tarification sans restitutions). Dans le cadre d'une renégociation de la répartition de l'eau entre l'agriculture et les autres secteurs, l'imposition de quotas électrique aurait donc de grandes chances d'avoir la préférence des agriculteurs, mais également des décideurs politiques.

Le risque majeur d'une telle politique cependant est l'installation d'une course à la capacité de pompage, et donc à long terme à une augmentation de la consommation en eau. Devant la rareté de la ressource électricité, les producteurs verront un intérêt à améliorer l'efficacité de pompage : par une meilleure efficacité hydraulique des pompes qu'ils utilisent et par une capacité plus importante (débit plus fort). Cependant, face à la nécessité de ce réajustement, tous les producteurs ne seront pas égaux. Seuls les producteurs les plus favorisés (avec une capacité d'investissement) pourront investir dans des nouvelles pompes leur permettant de retrouver leur capacité initiale de pompage. La mesure risque donc d'être discriminatoire envers les petits producteurs, au profit des gros producteurs¹³.

¹³On voit mal, en effet, le gouvernement aider les petits producteurs à investir dans des capacités de pompage plus importantes au nom de la réduction des distorsions de concurrence, quand l'agenda est à la réduction de la consommation par l'agriculture !

8.8 Promouvoir le changement technique

8.8.1 Quelles techniques ?

Après avoir passé en revue les options économiques (tarification et quotas électriques), nous étudions maintenant le deuxième type d'options contemplées par le gouvernement mexicain : la promotion de techniques nouvelles qui réduisent les consommations en eau des systèmes de cultures. Diverses options existent et peuvent être promues au niveau des puits collectifs. Certaines options correspondent à des changements de techniques d'irrigation comme l'adoption de l'irrigation par aspersion et de l'irrigation au gouttes à gouttes. Comme nous l'avons justifié antérieurement, nous ne les avons cependant pas retenus pour notre étude (Section 5.3.1 page 130) et nous nous concentrerons sur les techniques de cultures à base de semis direct.

Le semis direct est un système de semis dans lequel la semence est placée directement dans le sol qui n'est jamais travaillé. Seul un petit sillon ou un trou, de profondeur et de largeur suffisantes, est ouvert avec des outils spécialement conçus à cet effet, pour garantir une bonne couverture et un bon contact de la semence avec le sol. L'élimination des mauvaises herbes, avant et après le semis pendant la culture, est faite avec des herbicides. Dans ces systèmes, le sol n'est pas travaillé et une couverture morte ou vivante est maintenue en permanence. Les pailles proviennent des résidus de cultures, de cultures intercalaires ou de cultures dérobées. L'isolement de la surface du sol par un paillis de résidus végétaux provoque un ombrage du sol et limite donc les échanges entre le sol et l'atmosphère. La limitation des transferts thermiques et hydriques entre le sol et le milieu extérieur favorise l'accumulation de l'eau et retarde l'évaporation de l'eau du sol.

Les effets de l'introduction du semis direct dans les systèmes de cultures irrigués de la région sur les consommations en eau sont encore en cours d'évaluation. Les coefficients techniques pris en compte dans nos simulations sont donc les meilleures estimations disponibles à ce jour sur le sujet.

Les concepts du semis direct furent introduits dans la zone d'étude depuis les années 80. Elle a été promue dans la région par le biais de divers appuis techniques et des incitations économiques substantielles pour les producteurs (subventions sur les équipements, accès au crédit, etc.). Dans les

zones irriguées, le semis direct a été largement adopté durant le cycle d'été sur les cultures de maïs et de sorgho (Jourdain *et al.*, 2001a ; Jourdain *et al.*, 2001b). Nous avons donc considéré le semis direct sur les cultures du cycle d'été comme partie intégrante des options disponibles pour les producteurs. Par contre, la technique est encore peu adoptée durant le cycle d'hiver sur les cultures d'orge et de blé. De nombreuses raisons technico-économiques peuvent être invoquées pour expliquer cette adoption différenciée en fonction des cycles de cultures : inadéquation des semoirs aux conditions de la région, longueur d'inter-cycle plus importante laissant aux producteurs le temps de préparer leur terrain, problème induits par la gestion des résidus de cultures. Ce faisceau de problèmes agit pour le moment en défaveur de l'adoption du semis direct par les producteurs.

On peut également argumenter que la technique du semis direct n'a actuellement pas été appropriée durant le cycle d'hiver du fait des externalités qui apparaissent au moment du développement des nouvelles techniques. Pour un producteur, l'adoption d'une nouvelle technique comporte un coût fixe important et une période d'incertitude importante. Du point de vue de la communauté, il serait intéressant de tester le nouvel arrangement/technique pour pouvoir évaluer concrètement sa validité. Mais cela ne peut se faire qu'en l'adoptant ! Le premier producteur qui investit dans le développement de la technologie obtiendra des dividendes si celle-ci est réellement intéressante, mais risque également de perdre si elle s'avérait inadéquate aux conditions de l'agriculteur. Les premiers à adopter (et éventuellement à adapter) la nouvelle technique fournissent donc une information importante aux autres producteurs pour laquelle ils ne sont pas rémunérés¹⁴. Du fait du caractère public de l'information générée, l'expérimentation de nouvelles techniques est socialement nécessaire mais aucun producteur n'a intérêt à s'engager dans le processus (Binswanger et Ruttan, 1978). En l'absence de coordination entre producteurs ou d'un fournisseur extérieur public fiable¹⁵, l'expérimentation des nouvelles techniques est donc sous-employée (Arthur, 1989 ; Cowan et Gunby, 1996 ; Arthur, 1999 ; Cowan et Jonard, 2003). Un processus de développement participatif en réseau, où des échanges entre les participants des

¹⁴De fait, les producteurs observent attentivement les expériences de leurs voisins !

¹⁵La confiance des producteurs envers les fournisseurs classiques d'information, c'est à la recherche publique et le système de vulgarisation, est très limitée (Bénard, 2001)

informations générées par chacun sont organisés, peut permettre de lever ce genre de barrière (Hocdé et Miranda, 2000).

C'est d'ailleurs l'objectif que s'est fixé le projet *ASOSID*¹⁶ en essayant de lever les problèmes techniques liés à l'adoption du semis direct dans des systèmes de cultures irrigués. Depuis 2001, le projet s'est engagé auprès des principaux acteurs locaux (organisations de producteurs, gouvernement, recherche, secteur privé) dans la conception et la mise en route d'un projet de recherche-développement se proposant de faire émerger une agriculture durable à l'échelle régionale via le développement participatif d'innovations technologiques et socio-organisationnelles. Au niveau agronomique, l'accent est mis sur les systèmes de culture sous couverture végétale, alors qu'au niveau socio-organisationnel, c'est l'organisation des producteurs et l'élaboration de nouvelles règles collectives de gestion des ressources en eau qui est au cœur de la proposition ASOSID.

A partir des informations techniques recueillies à ce jour au sein de ce projet, nous analyserons l'impact qu'aurait cette technique si son développement était achevé et que les producteurs considéraient ce type de technique comme envisageable. On ne s'intéresse donc pas ici directement à la phase d'adoption/adaptation des techniques.

8.8.2 Introduction des techniques dans notre modèle

Pour les simulations présentées dans les paragraphes précédents nous avons volontairement réduit l'espace des possibles des producteurs aux cultures et aux techniques actuellement en usage et considérées comme fiables, n'y étaient donc pas inclus les systèmes de cultures utilisant le semis direct durant le cycle d'hiver.

Pour les simulations qui suivent, l'introduction et la promotion du semis direct dans la région correspondra à une augmentation de l'univers des techniques possibles aux yeux des producteurs. Pratiquement, cela se traduit par l'ajout des activités nouvelles dans l'ensemble des activités possibles pour le producteur. On fait donc complètement abstraction de toute la période d'apprentissage de la technique par les producteurs, pour s'intéresser au nouvel

¹⁶ASOSID : « Agricultura **SO**stenible basada en la **SI**embra **D**irecta », soit littéralement : Agriculture durable basée sur le semis direct

équilibre engendré par l'introduction de la technique.

8.8.3 Effet du changement technique seul

L'introduction du semis direct comme option technique durant le cycle d'hiver, sans changement des tarifs électriques, amène la plupart des groupes à réduire de manière substantielle leur consommation en eau (Tableau 8.9).

	1b	2	5	6
Coopératif	-20	-19	-20	-23
Non-Coopératif	-18	-17	-18	-21

TAB. 8.9 – Effet de l'introduction du semis direct durant le cycle d'hiver sur la consommation en eau

Cependant, pour le groupe 1a, produisant majoritairement de la luzerne, l'introduction du semis direct ne suffit pas à remettre en cause l'équilibre obtenu. Les consommations du groupe 1a sont donc identiques avec ou sans la possibilité de semis direct en hiver.

Globalement donc, le semis direct apparaît comme une option technique intéressante, tant au point de vue de la compétitivité des cultures céréalières que comme instrument de réduction de la consommation brute en eau par les producteurs.

Cependant, en fonction de la configuration du groupe, l'introduction du semis direct peut conduire à certains effets indésirables : augmentation des superficies irriguées, diminution de la vigilance sur l'eau. Par ailleurs, la seule introduction du semis direct ne permet pas d'atteindre les objectifs fixés d'une réduction de 30 à 45% des consommations brutes en eau.

8.8.4 Interactions entre changement technique et tarification électrique

8.8.4.1 Courbes de demande en eau

Une fois réglés les ajustements techniques nécessaires, il est probable que les producteurs adopteront le semis direct durant le cycle d'hiver sans ajustement supplémentaires des variables économiques. Les résultats du modèle

montrent en effet, une adoption du semis direct au tarif actuel de l'électricité, même dans un contexte non-coopératif.

Cependant, pour atteindre les objectifs de réduction de consommation fixés au secteur agricole, on pourrait imaginer l'action simultanée de la promotion du changement technique et de la tarification électrique. Le premier donne des options nouvelles pour l'économie de l'eau, le deuxième produit les incitations économiques en faveur des économies d'eau.

Les courbes de demande des groupes 1*b* et 2 sont représentées dans les figures 8.30, 8.31, 8.32 et 8.33. On voit que le semis direct permet d'abaisser les courbes de demande de manière significative. Cependant, par une diminution générale des coûts de production notamment de préparation du sol, le semis direct rend les systèmes de production plus résilients aux variations du prix de l'électricité. On observe une amorce beaucoup plus lente de la phase III des courbes de demande : les producteurs abandonnent le cycle d'hiver moins rapidement qu'en l'absence de l'option semis direct. La conséquence directe est pour les puits où la réduction de la consommation est obtenue par une diminution des surfaces irriguées (groupe 2), l'augmentation du prix de l'électricité nécessaire pour amener les producteurs à atteindre les objectifs de consommation devra être plus importante ! En revanche, pour le groupe 1*b*, l'introduction du semis direct, dans le cadre d'un puits coopératif, diminue l'augmentation de prix requise pour atteindre les objectifs de réduction.

L'introduction du semis direct en interaction avec la tarification peut donc conduire à des effets contrastés en fonction de la configuration des puits sur lesquels elle s'applique. En outre, on notera que les deux outils aux effets propres bénéfiques peuvent devenir moins efficaces quand ils sont combinés.

8.8.4.2 Effets sur les revenus

Au prix initial, l'introduction du semis direct permet une très légère augmentation de revenus du groupe.

Plus marquant, l'introduction du semis direct diminue l'impact du prix de l'électricité sur les revenus des groupes (Figure 8.34). En conséquence, plus les prix sont importants, plus l'impact du semis direct sur les revenus des producteurs est fort.

La non-coopération entre les producteurs ne change pas fondamentale-

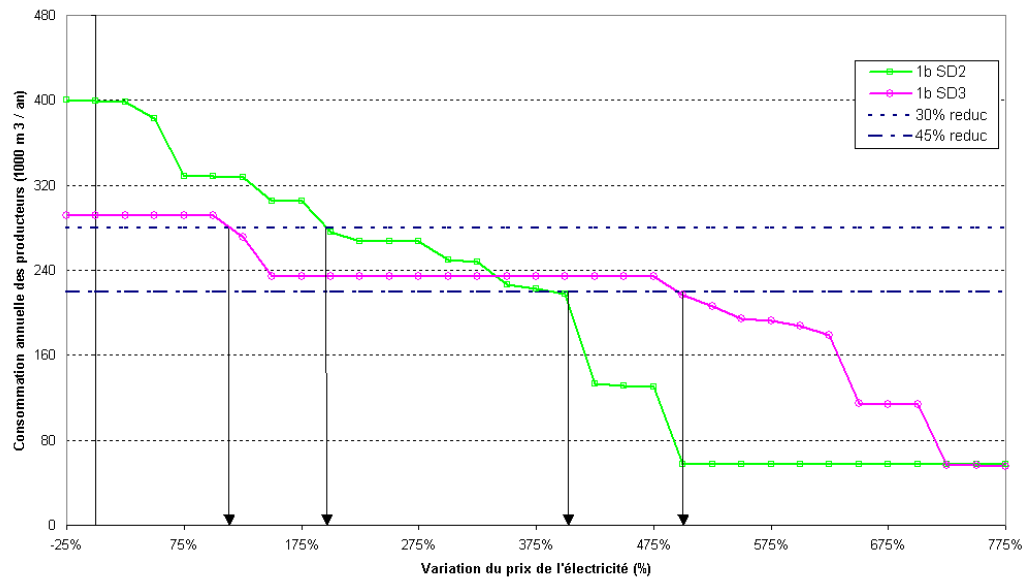


FIG. 8.30 – Effet du l'introduction du semis direct sur la courbe de demande (groupe 1b, équilibre coopératif)

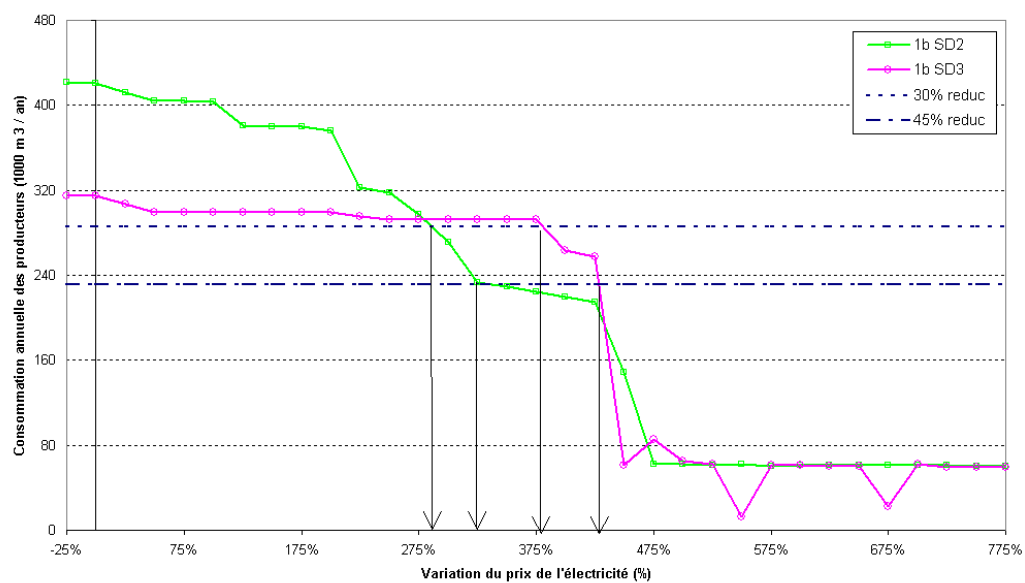


FIG. 8.31 – Effet du l'introduction du semis direct sur la courbe de demande (groupe 1b, équilibre non coopératif)

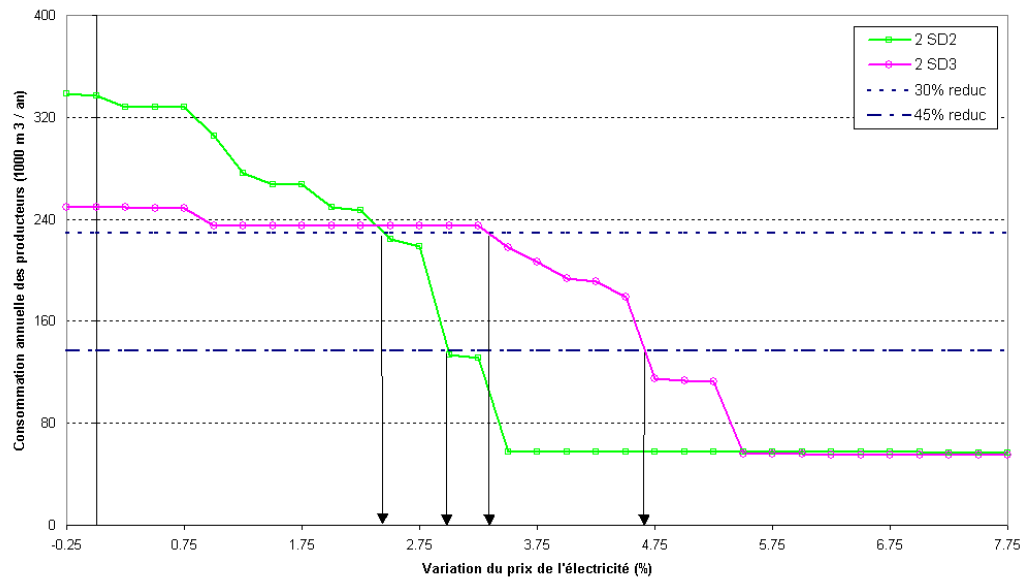


FIG. 8.32 – Effet de l'introduction du semis direct sur la courbe de demande (groupe 2, équilibre coopératif)

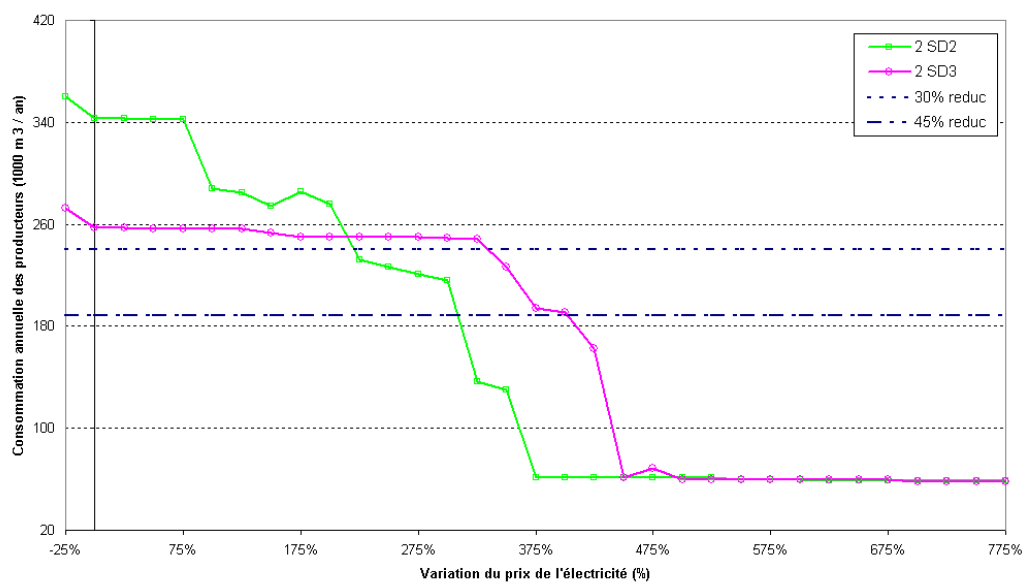


FIG. 8.33 – Effet de l'introduction du semis direct sur la courbe de demande (groupe 2, équilibre non coopératif)

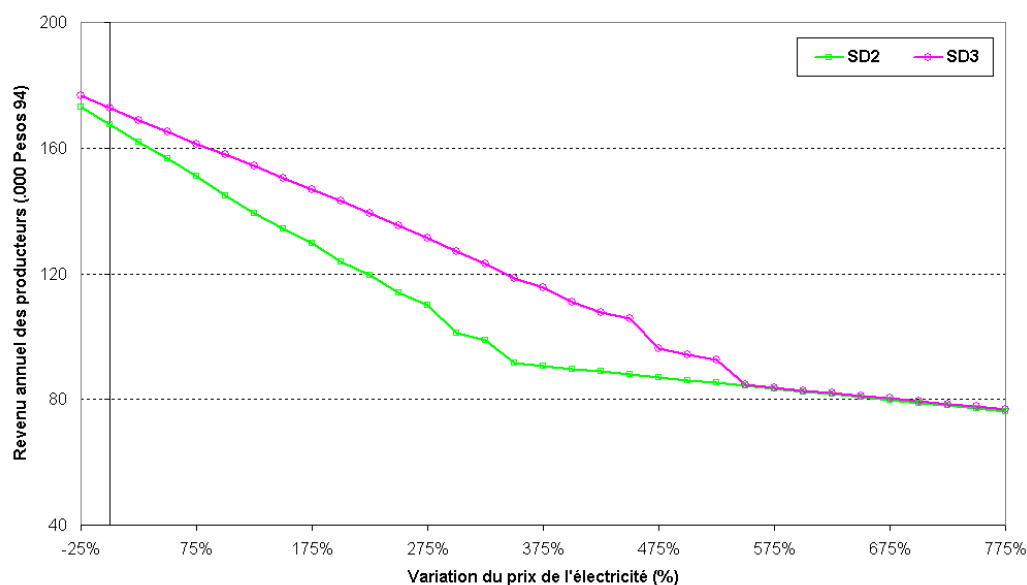


FIG. 8.34 – Effet du l'introduction du semis direct sur les revenus collectifs (groupe 2, équilibre coopératif)

ment les résultats obtenus. On constate cependant qu'à partir d'un certain niveau d'augmentation du prix de l'électricité, la non-coopération entre les membres du groupe combinée à l'introduction du semis direct engendre des antagonismes importants. Les effets positifs du semis direct sont annulés par la non-coopération entre producteurs (Figure 8.35).

8.8.5 Conclusion sur le changement technique

La promotion du changement technique est une des solutions les plus avantageuses pour les producteurs de la région. Elle permet la diminution des consommations sans les réductions de revenus consenties par les autres méthodes.

Avec les hypothèses prises, la non-coopération entre les agents n'interdit pas l'adoption du semis direct au sein des groupes. En fait, avec l'introduction du semis direct, l'écart entre les équilibres coopératifs et non-coopératifs diminue.

Les limites de cette approche apparaissent cependant quand on cherche des réductions drastiques de la consommation en eau par l'agriculture. Le semis direct rendant les systèmes plus résilients, on diminue également leur

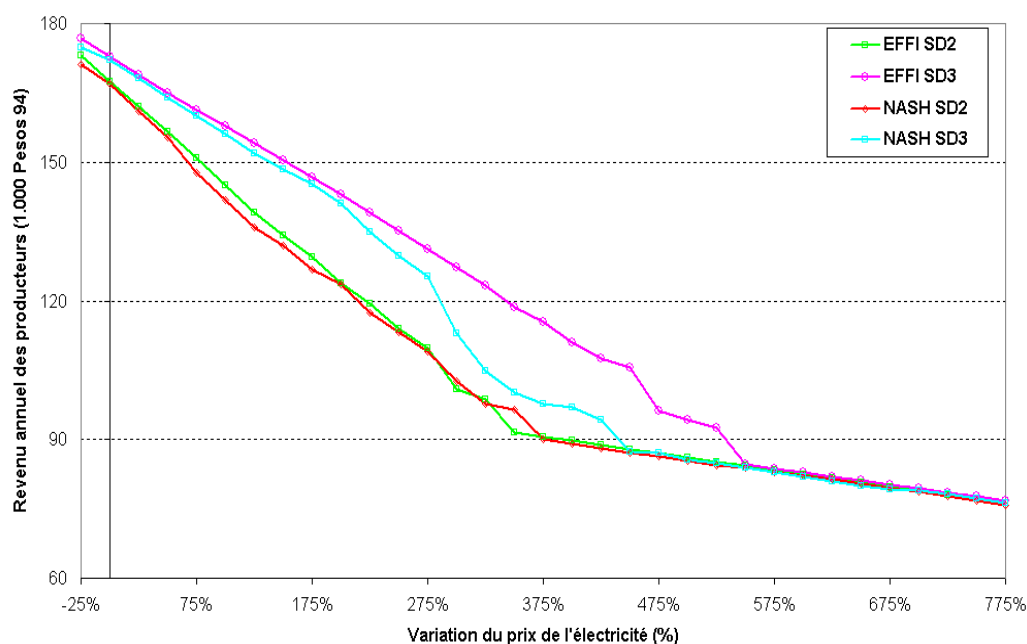


FIG. 8.35 – Introduction du semis direct dans un cadre non-coopératif (groupe 2)

élasticité aux instruments économiques, notamment la tarification.

8.9 Conclusions

Ce chapitre nous a permis d'avoir une appréciation quantitative sur les effets des différents instruments de politique visant une réduction de la consommation en eau des systèmes de production agricoles. Cependant, au regard de la densité des résultats obtenus, nous avons préféré rassembler nos conclusions au sein d'un chapitre récapitulatif des impacts de ces différents instruments.

Par ailleurs, nous avons pris le scénario, « simpliste » qui consisterait à chercher une diminution identique pour tous les groupes de producteurs. La réalité administrative impose cependant que l'on développe une seule politique appliquée de manière identique à tous les producteurs. Dans le prochain chapitre, nous prendrons donc cette nouvelle posture, qui consiste à analyser au niveau d'un aquifère stylisé, l'impact différencié des politiques sur les différents systèmes irrigués.

Chapitre 9

Récapitulatif sur les instruments et premiers éléments d'une analyse agrégée

9.1 Introduction

Le chapitre précédent a présenté l'impact des différents outils permettant d'arriver à une gestion effective de la demande en eau des puits collectifs. Tous les instruments, nous l'avons vu, permettent d'obtenir une réduction effective de la demande, mais ont des implications très différentes non seulement pour l'agriculture irriguée prise dans son ensemble, mais également pour les différents types de producteurs au sein du secteur.

Dans ce chapitre nous essayons de mettre en perspective les différents instruments à la disposition du décideur politique pris individuellement ou combinés. Les figures 9.1 à 9.5 résument l'impact des différents instruments et de leurs combinaisons pour les différents groupes, si l'on suppose que les groupes sont initialement dans un équilibre non-coopératif. A l'inverse, les figures 9.6 à 9.10 supposent que les groupes sont initialement dans un équilibre coopératif.

De toutes les combinaisons possibles, la combinaison du changement technique avec le changement institutionnel au sein des groupes d'une part, et la tarification avec remise fixe présent des avantages comparatifs certains par rapport aux autres instruments. Nous discuterons donc plus en détail ces

deux options, avec leurs avantages/inconvénients respectifs.

Dans une deuxième section, nous nous préoccupons de la même question mais étudiée à une échelle différente : comment, au niveau de l'aquifère, peut-on amener les puits à diminuer globalement leur consommation de l'ordre de 30 à 45%. A cette échelle, on pourra permettre des changements de consommation différenciés entre les producteurs. Nous analyserons donc les transferts, tant en eau qu'en revenus, qui s'opèrent alors entre les différents puits.

9.2 Récapitulatif des effets des instruments

9.2.1 Aucun des instruments pris individuellement n'est satisfaisant

Le travail sur les institutions au sein des puits collectifs Au niveau actuel du prix de l'électricité, n'apporte pas une réduction très importante de la consommation en eau, ni ne modifie considérablement le revenu des producteurs. Les groupes utilisent au maximum leurs capacités de pompage : toute diminution de consommation par un des membres du groupe est reprise par un autre membre. Au mieux, certaines règles permettent de rétablir une certaine justice pour l'accès à la ressource, sans toutefois atteindre l'efficience, sauf dans le cas d'une tarification interne au prorata des consommations.

La tarification électrique établit des incitations à la réduction de la consommation. Cependant, vue la faible élasticité des systèmes irrigués au prix de l'électricité, les tarifs requis pour obtenir une diminution significative de la consommation sont politiquement difficiles à envisager. On imagine mal en effet un gouvernement mettre en place une augmentation, même progressive de 300 à 500% des tarifs électriques pour un secteur déjà fragilisé par ailleurs.

Les quotas électriques permettraient de réduire de manière simple la consommation des systèmes irrigués. Ils sont peut-être plus faciles à négocier et à mettre en place car ils impliquent une baisse des revenus moins importante que dans le cas de la tarification. En quelque sorte, avec les quotas, les

GROUPE 1a

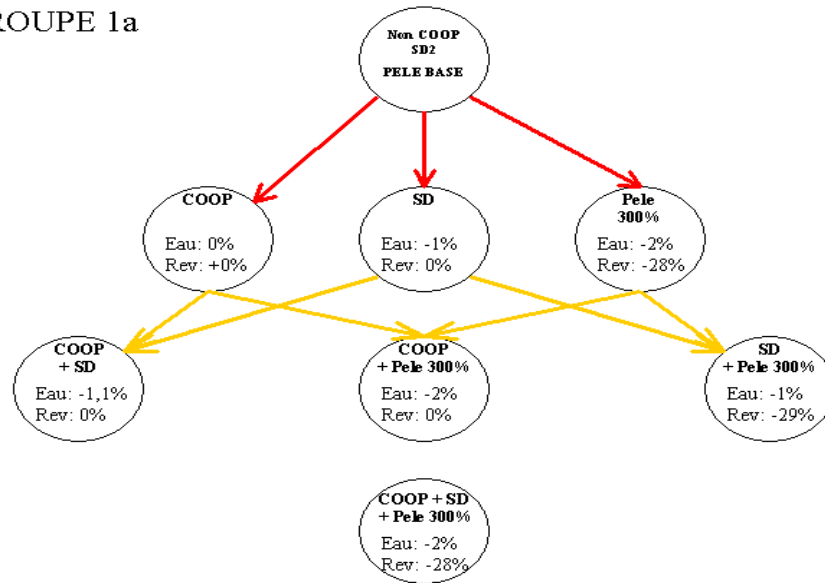


FIG. 9.1 – Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes non-coopératifs (groupe 1a)

GROUPE 1b

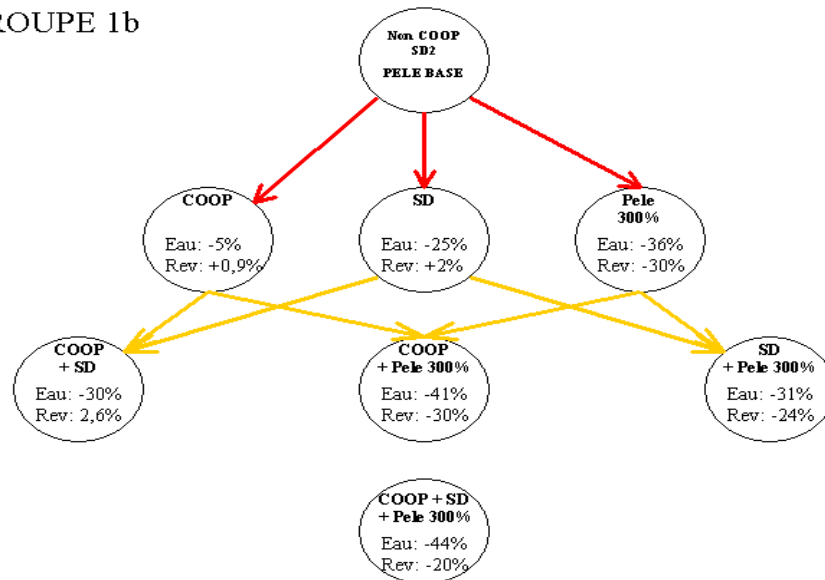


FIG. 9.2 – Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes non-coopératifs (groupe 1b)

GROUPE 2

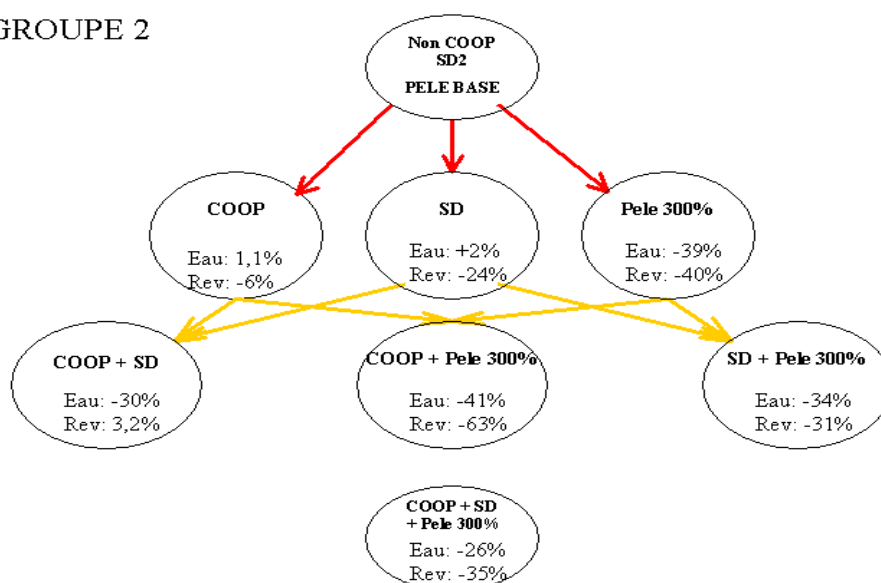


FIG. 9.3 – Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes non-coopératifs (groupe 2)

producteurs ne sont pas doublement affectés car ils ne subissent que la réduction de la disponibilité de la ressource, mais pas l'augmentation des coûts de pompage. Cependant, on peut craindre l'installation d'une certaine « course à la pompe », les producteurs les plus aisés pouvant contourner la restriction par l'installation d'unités de pompage plus importantes.

Le changement technique : Le nombre des options techniques que l'on peut mettre en place au niveau des puits collectifs est beaucoup plus limité que dans le cas des puits individuels pour des raisons essentiellement d'organisation (la gestion de l'eau sous pression nécessite une organisation différente de l'irrigation qui requiert un niveau d'entente supérieur). Cependant, nous avons vu que l'introduction du semis direct durant le cycle d'hiver peut apporter une aide significative à la réduction de la consommation en eau. Celle-ci se fait sans préjudices aux revenus des producteurs, elle constitue donc une option potentiellement intéressante si la préoccupation des politiques est de minimiser l'impact sur les revenus des producteurs.

Cependant, le semis direct, tel qu'il est envisagé jusqu'alors par leurs

promoteurs dans la région, n'apporte aucune solution pour les productions fourragères pourtant grosses consommatrices en eau. Les incitations pour ces producteurs sont inchangées. Par ailleurs, la seule introduction du semis direct atteint ses limites quand on cherche des réductions importantes de consommation. Enfin, pour le décideur politique, la promotion et le développement du semis direct est une opération coûteuse qui n'est pas forcément défendable en termes d'allocation inter-sectorielle des fonds publics (cf. infra).

GRUPE 5

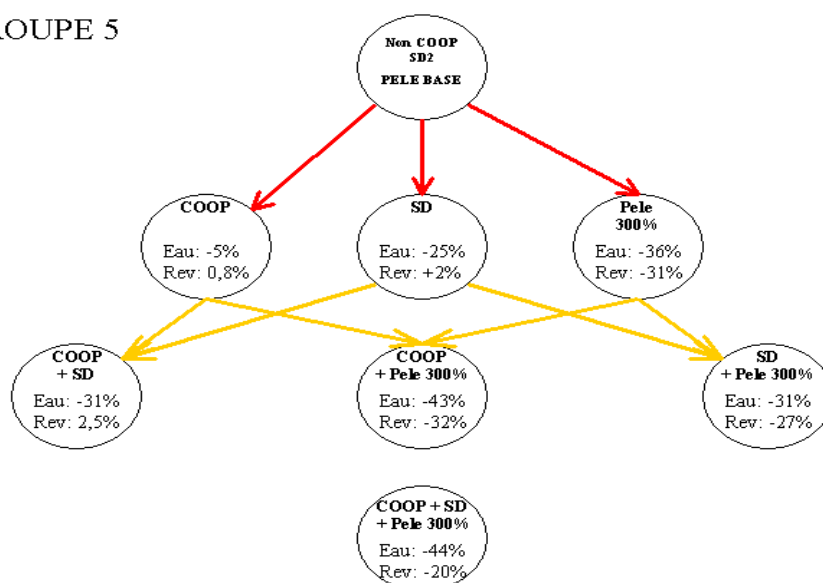


FIG. 9.4 – Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes non-coopératifs (groupes 5)

9.2.2 Travail institutionnel et changement technique

Le fait qu'aucun des instruments pris isolément n'ait les qualités requises invite le décideur à rechercher les synergies éventuelles entre les instruments. Parmi celles-ci, la combinaison entre le travail institutionnel et le changement technique présente un grand intérêt. En effet, elle permet, d'augmenter le revenu des producteurs tout en diminuant substantiellement les consommations (de l'ordre de 30% en moyenne). Elle semble donc être une mesure intéressante en terme de politiques, car on bénéficie clairement de synergies entre les deux types d'instruments.

GROUPE 6

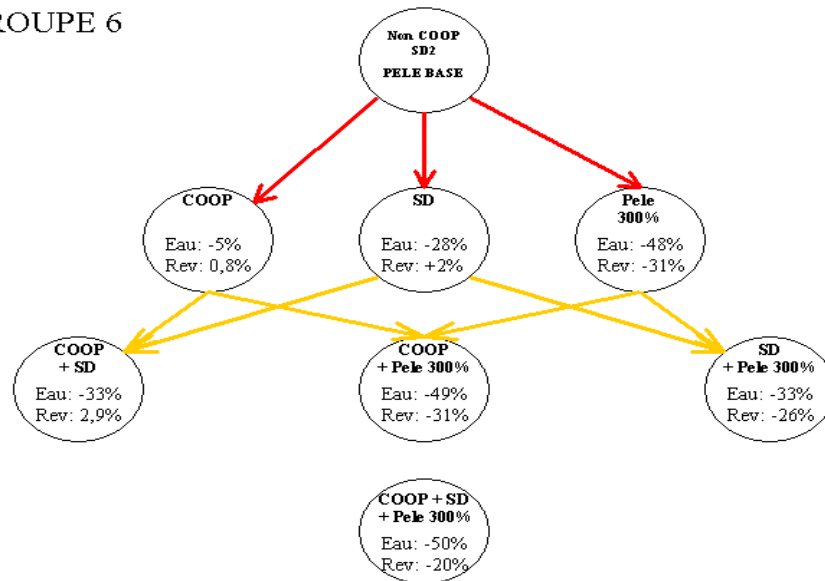


FIG. 9.5 – Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes non-coopératifs (groupe 6)

Elle présente cependant un certain nombre d'inconvénients, en partie hérités des instruments qui la composent :

- Ni le changement technique, ni les institutions au sein des groupes ne changent fondamentalement les incitations des producteurs en terme de consommation en eau. En ce sens, on ne résoud pas les problèmes de consommation des groupes produisant des cultures fourragères, ou pour les autres consommateurs (productions maraîchères au sein des puits individuels par exemple). On ne règle donc qu'un aspect de la question.
- Bien que l'on ait des synergies entre les deux types d'instruments, la combinaison atteint ses limites, quand on recherche une diminution importante de la consommation. La limite de réduction se situe aux environs de 30%, au-delà de cette limite, d'autres instruments sont à rechercher.
- Les changements techniques et institutionnels présentent toujours un certain degré d'incertitudes quant aux résultats attendus. Nous avons modélisé ici des systèmes de semis direct relativement parfaits, qui re-

présentent des techniques telles que les chercheurs l'envisagent. L'appropriation par les agriculteurs de la région de ces techniques peut réserver des surprises à leurs promoteurs :

- Le semis direct promu par les centres de recherche et celui tel qu'il est adopté à l'heure actuelle par les producteurs diffèrent sensiblement, notamment en ce qui concerne l'utilisation du paillis. Une des bases du semis direct sous couvert végétal, et ce qui lui confère toutes ses propriétés bénéfiques, est de couvrir le sol avec les résidus de la récolte précédente. Pourtant, la grande majorité des producteurs n'a pas adopté cet aspect de la technique. Or, l'absence de paillis enlève en grande partie les propriétés de conservation de l'eau.
- Il n'est pas toujours évident qu'une innovation même économiquement meilleure soit adoptée/adaptée par la population cible. Une littérature importante montre que les caractéristiques des systèmes d'innovation ont une grande influence sur les chances de réussite de l'appropriation de l'innovation par les utilisateurs potentiels (pour un dernier point récent voir, par exemple, Cowan et Jonard, 2003). Il n'est donc pas obligatoire qu'un changement technique à base de semis direct apparaissent dans la région qui nous concerne, même si ses propriétés intrinsèques sont intéressantes pour les producteurs de la région. L'histoire longue de la technique de la région nous invite même plutôt à la prudence sur ce sujet.
- La promotion des innovations, tant techniques qu'institutionnelles, est coûteuse. D'une part, elle suppose le maintien d'un système d'innovation important : chercheurs, vulgarisateurs, etc. D'autre part, l'Etat subventionne la technique par le biais d'aides directes à l'achat des équipements nécessaires (semoirs essentiellement). Subventions sur les tarifs électriques et promotion des innovations constituent en quelque sorte un double appui à l'agriculture irriguée, au dépens des autres secteurs. De plus les deux instruments envoient des incitations antagoniques aux producteurs. Vu du seul point de vue de la réduction de la consommation de l'eau, la promotion des innovations techniques et institutionnelles isolée des autres instruments à la disposition du décideur politique ne devrait donc pas avoir la priorité.

La combinaison proposée est donc potentiellement intéressante, au moins

GROUPE 1a

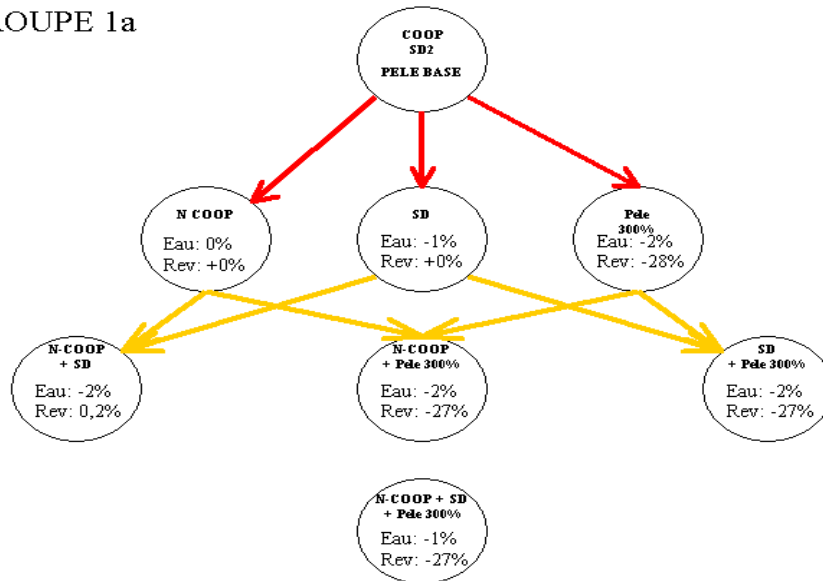


FIG. 9.6 – Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes coopératifs (groupe 1a)

GROUPE 1b

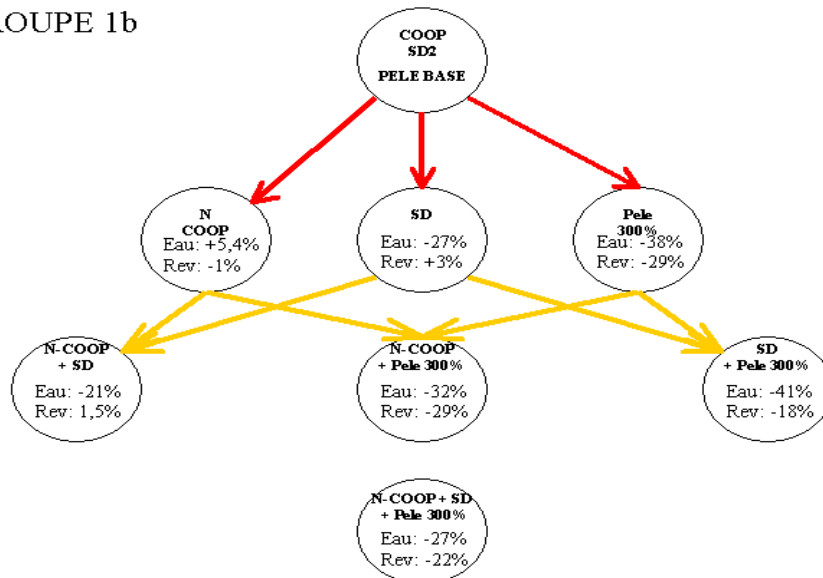


FIG. 9.7 – Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes coopératifs (groupe 1b)

GROUPE 2

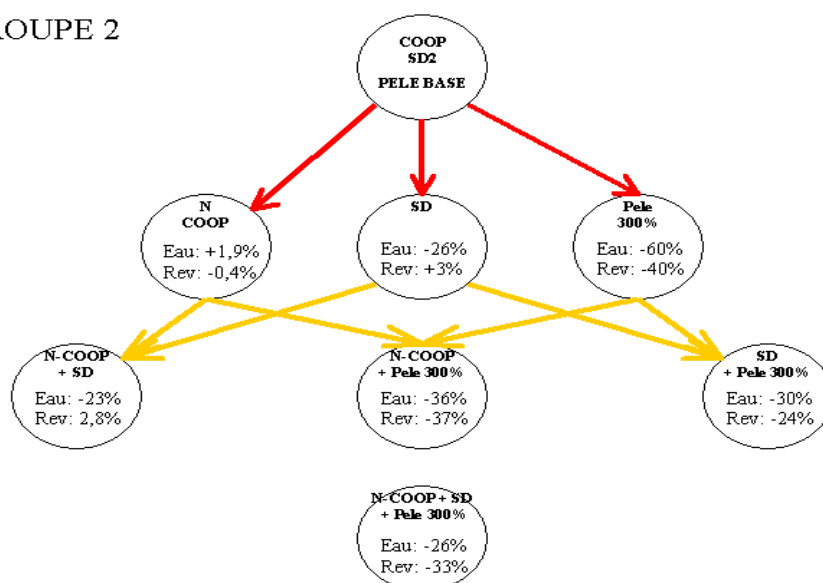


FIG. 9.8 – Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes coopératifs (groupe 2)

en terme d'efficacité. L'incertitude sur le cycle d'innovation et les problèmes de double paiement à l'agriculture amène cependant à douter de la pertinence de sa seule utilisation.

9.2.3 Vers une synergie entre les instruments ?

L'augmentation des tarifs électriques permet d'annuler les subventions sur l'extraction d'une ressource et éventuellement de capturer une partie de la rente procurée par celle-ci. Pour l'Etat, elle élimine également les considérations de développement des techniques à l'issue incertaine. En utilisant la tarification, on passe d'un double paiement de l'état à l'agriculture à une logique de double paiement de l'agriculture à l'Etat.

Une solution intermédiaire consiste, nous l'avons vu à restituer tout ou partie des gains budgétaires provenant de l'augmentation des tarifs électriques. On peut alors envisager plusieurs cas de figure :

- *La restitution à l'agriculture est complète.* On prive le secteur agricole d'une certaine partie de l'eau qu'elle consommait, mais on lui restitue la rente procurée par son utilisation. En n'accompagnant pas le système

GROUPE 5

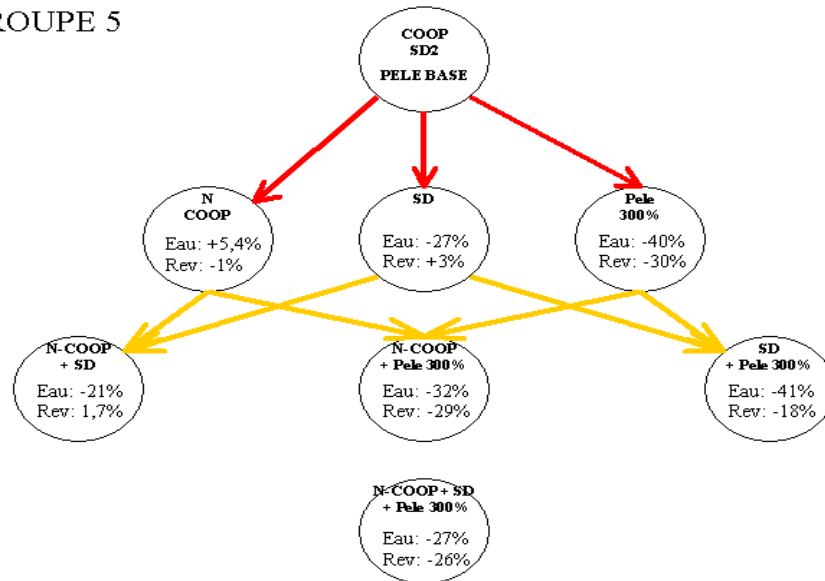


FIG. 9.9 – Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes coopératifs (groupe 5)

GROUPE 6

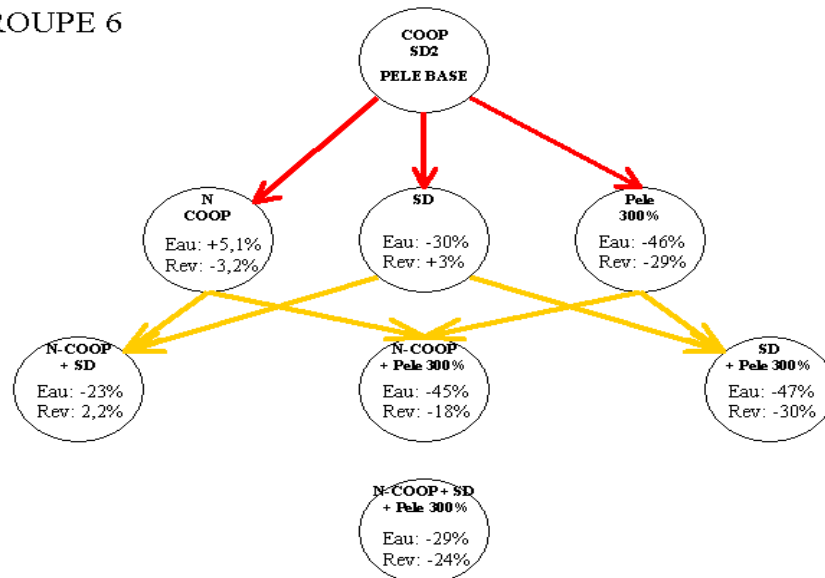


FIG. 9.10 – Graphe synthétique des effets des différents instruments sur les groupes coopératifs (groupe 6)

d'innovations, l'Etat fait entièrement confiance aux incitations pour le changement de structure qui ne manquera pas de s'opérer : on s'en remet alors complètement à l'innovation induite.

- *La restitution à l'agriculture n'est pas complète.* On ponctionne partiellement le secteur agricole, au profit des autres secteurs. L'agriculture est donc doublement taxée : par une réduction de l'accès à l'eau, et par une perte de la rente d'extraction. Les résultats d'une telle politique risquent donc d'être brutaux.
- *La restitution à l'agriculture n'est pas complète, mais le solde est utilisé pour financer la promotion du changement technique et institutionnel.* Ce système permet de mettre en place un système cohérent d'incitations économiques, et d'accompagner le secteur agricole dans la recherche de solutions techniques, par le maintien d'un système d'innovation fort¹. Dans ce cas de figure, tous les instruments sont utilisés de manière synergique.

Le choix entre ces trois solutions est de nature essentiellement *politique* et résultera de la négociation entre les différents secteurs de la société et entre les différents types de consommateurs de l'eau.

La dernière solution semble cependant représenter un compromis intéressant car elle utilise au maximum les synergies possibles entre les différents instruments à la disposition de l'Etat. Elle permet également de financer l'appui aux innovations directement par le secteur concerné, sans faire appel aux autres secteurs.

Comme des transferts s'effectueront entre les gros et les petits consommateurs d'eau, ce sont les premiers qui financeraient la recherche et le développement d'innovations dans la région. Concrètement dans la région d'étude, cela impliquerait que les producteurs de fourrages et de cultures maraîchères financeraient le plus l'effort de recherche. Cela revient donc à mettre en place un financement par l'agriculture d'exportation de la recherche/développement en vue du maintien de l'agriculture céréalière de la région.

Enfin, contrairement à la promotion des solutions techniques et institutionnelles, l'instrument économique atteint tous les types de producteurs. Les plus gros consommateurs d'eau sont également les plus touchés par la mesure.

¹Nous renvoyons ici le lecteur à notre digression sur l'intérêt d'une recherche publique en agriculture de la section 8.8.1.

Les incitations correctes viendront aider les processus d'innovation dans le sens d'une recherche des économies en eau.

9.3 Agrégation au niveau d'un aquifère : premiers éléments numériques

Afin d'obtenir des relations analytiques relativement simples, on estime tout d'abord les courbes de demande en eau pour les trois grands groupes représentatifs 1a, 1b et 2 à partir des données de simulation précédentes. Au regard des formes générales des courbes, on estime les paramètres de courbes linéaires par morceaux à trois pans.

On obtient pour chacun des groupes :

$$D1A(p) = \begin{cases} 867857 - 31961p & \text{si } p \leq 2,09, \\ 4333957 - 1701066p & \text{si } p > 2,09 \text{ et } p \leq 2,5 \\ 84836 & \text{si } p > 2,5 \end{cases}$$

$$D1B(p) = \begin{cases} +395283.5 & \text{si } p \leq 0,33, \\ +479604.79 - 263887.16p & \text{si } p > 33 \text{ et } p \leq 1,6 \\ 57232 & \text{si } p > 1,6 \end{cases}$$

$$D2(p) = \begin{cases} 332786.5 & \text{si } p \leq 0,44, \\ 470966.1 - 322228.4p & \text{si } p > 44 \text{ et } p \leq 1,3 \\ 57232 & \text{si } p > 1,3 \end{cases}$$

Les courbes de demande sont représentées pour les trois groupes dans la figure 9.11.

$$Rev1A(p) = \begin{cases} 110896 - 16475p & \text{si } p \leq 2,31, \\ 369036 - 125249p & \text{si } p > 2,31 \end{cases}$$

$$Rev1B(p) = \begin{cases} 103000 - 9547p & \text{si } p \leq 1,43, \\ 180000 - 62979p & \text{si } p > 1,43 \end{cases}$$

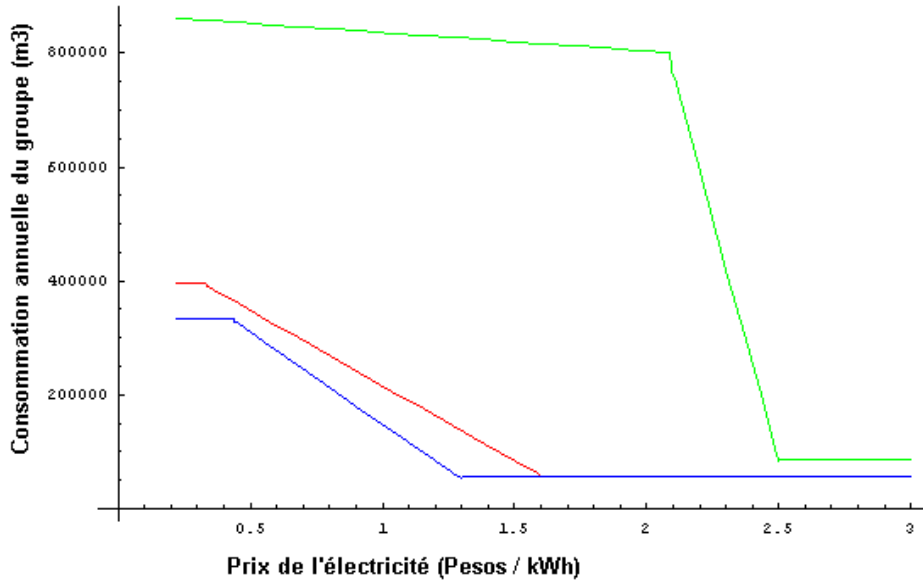


FIG. 9.11 – Courbes de demande en eau des différents types de puits

$$Rev2(p) = \begin{cases} 108056 - 16149p & \text{si } p \leq 1,05, \\ 167458 - 70332p & \text{si } p > 1,05 \end{cases}$$

Les courbes de revenus sont représentées pour les trois groupes dans la figure 9.12.

Pour une distribution donnée des différents types de groupes :

$$\begin{cases} N_{1a} & 500 \\ N_{1b} & 600 \\ N_2 & 500 \end{cases}$$

on peut calculer une courbe de demande agrégée $N_{1a} \cdot D1A(p) + N_{1b} \cdot D1B(p) + N_2 \cdot D2(p)$. La courbe de demande ne peut se réduire à une forme algébrique simple, on la représente donc graphiquement, et on peut obtenir une solution graphique du prix de l'électricité nécessaire pour obtenir une réduction de la demande globale sur l'aquifère de 30% (Figure 9.13)

Pour une réduction globale de 30%, il faut donc passer d'un tarif de 0,22 à un tarif de 1,12 Pesos / kWh, soit une augmentation d'environ 410%. A ce

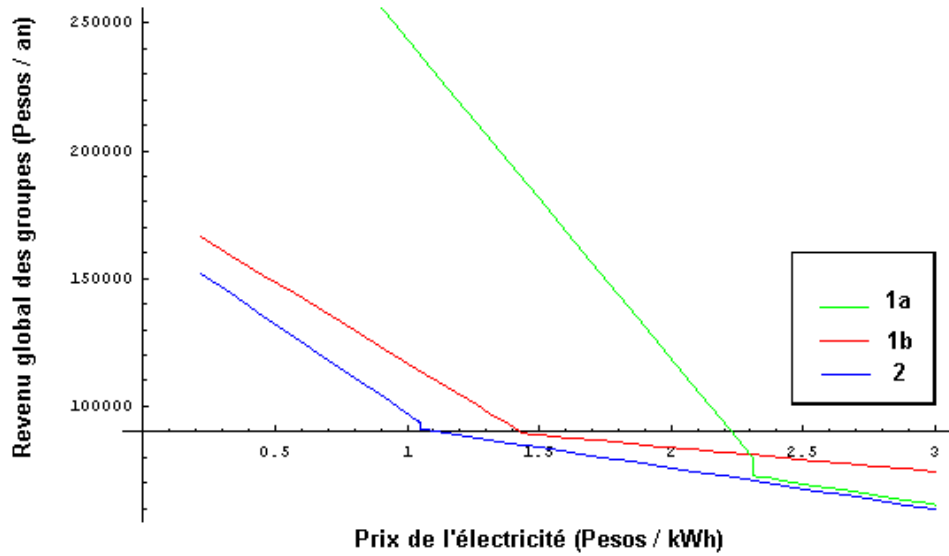


FIG. 9.12 – Revenus générés par les puits en fonction des tarifs électriques

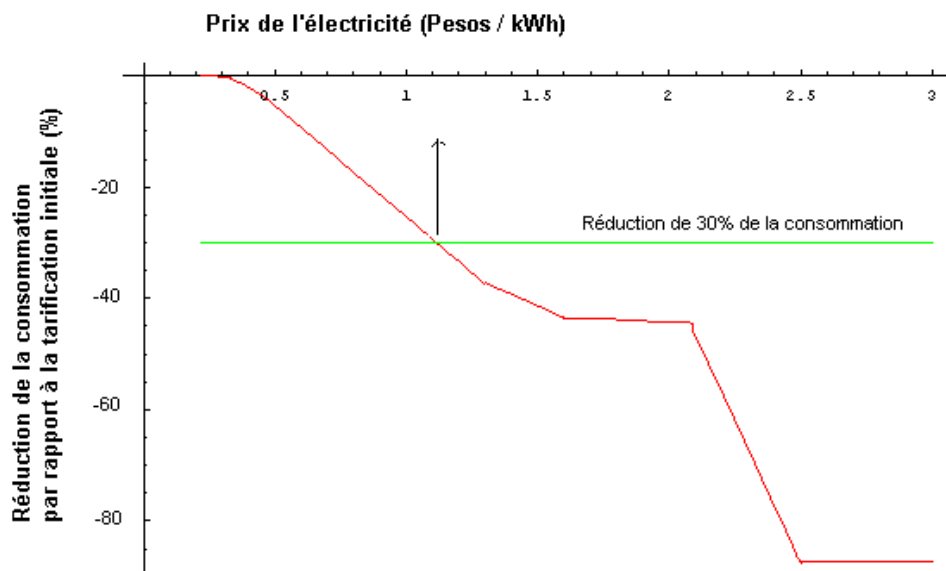


FIG. 9.13 – Courbes de demande en eau agrégée

niveau d'augmentation, les réductions consenties varient beaucoup selon le type de producteurs (Tableau 9.1). Dans notre cas de figure, ce sont d'ailleurs les plus gros consommateurs qui réduisent le moins leur consommation. Les réductions de revenus sont elles moins contrastées, même si l'on retrouve que les producteurs les plus touchés sont ceux qui ont la ressource la plus dégradée (groupe 2).

Réduction (%)	1a	1b	2
Consommation	3,5	53	66
Revenu	33	34	40

TAB. 9.1 – Réductions de consommation différenciées entre groupes

A ce prix de l'électricité, on calcule la remise nécessaire pour que chaque type de producteur ne connaisse pas de pertes de revenus. Cette remise correspondrait donc à une sorte de compensation de revenus pour l'eau non-consommée, que l'on pourra également interpréter comme un coût d'opportunité de l'eau d'irrigation. Ce coût d'opportunité varie beaucoup entre les types de producteurs (Tableau 9.2).

	1a	1b	2
Remise (Pesos/ha/mois)	276	138	152

TAB. 9.2 – Remise nécessaire pour éviter une perte des revenus par type de producteur

L'idéal serait bien sûr de pouvoir de réaliser une compensation en fonction du type de groupe rencontré. Cependant, cette solution « first-best » serait difficile à mettre en place. Du point de vue du dirigeant, on peut imaginer plusieurs critères de décision. Un premier critère pourrait être de ne pas ponctionner le secteur agricole dans son ensemble, quitte à admettre des transferts entre les différents types de groupes. On calcule alors la remise uniforme, qui annule l'effet global sur les revenus.

Etant données nos hypothèses on trouve une compensation moyenne de 185,9 Pesos/ha/mois, soit 2.230,8 pesos/ha/an². A ce niveau de prix on constate cependant une grande disparité dans les effets pour les producteurs :

²A titre de comparaison, on rappelle que les subventions aux revenus introduites pour une période de 15 ans pour aider les producteurs à gérer la transition de l'entrée dans l'ALENA est de 1.350 Pesos/ha/an dans les zones irriguées.

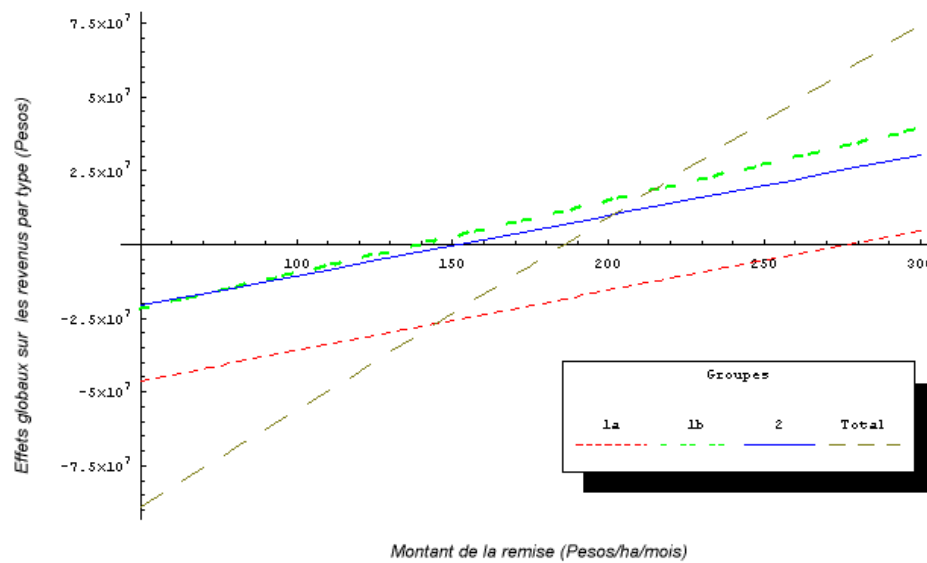


FIG. 9.14 – Effets différenciés des remises sur les revenus agrégés de chacun des groupes

les producteurs 1b et 2 sont largement bénéficiaires, alors que les producteurs 1a sont largement affectés par la nouvelle tarification (Tableau 9.3).

	1a	1b	2
Effet sur les revenus (%)	-10,7	+11,6	+9,1

TAB. 9.3 – Effets différenciés sur les revenus d’une remise moyenne de 190 Pesos/ha/mois

Des transferts monétaires s’opèrent donc entre les gros consommateurs d’eau vers les producteurs faiblement consommateurs d’eau. Le montant des transferts opérés entre les groupes en fonction du montant de la remise est représenté dans la figure 9.14. Au-delà du seuil de 185 Pesos/ha/mois, tous les producteurs bénéficient de la mesure de tarification. Entre 150 et 185 Pesos/ha/mois, le secteur pris dans son ensemble est pénalisé, mais certains producteurs bénéficient encore de la remise. En deçà de 150, tous les producteurs sont affectés par la nouvelle tarification.

Du point de vue du décideur politique, partie de la rente captée sur le secteur agricole, peut également être indirectement réaffectée sur le secteur

par le biais du financement de la recherche agronomique. Par exemple, dans notre cas de figure, pour une remise de 160 Pesos/ha/mois, les revenus des producteurs de type 1*b* et 2 sont légèrement gagnants (de l'ordre de 100 pesos par ha et par an), alors que les producteurs de type 1*a* enregistrent une perte de revenu substantielle de l'ordre de 1.400 Pesos/ha/an. Sur un plan global, la ponction sur l'ensemble des producteurs est de 16 millions de pesos. On peut réaffecter cette somme à des projets de recherche et développement, voire de promotion de certaines techniques favorables aux économies d'eau³.

On pourra ensuite chercher d'autres compromis en fonction des différentes pressions sociales. Si on suppose qu'aucun des groupes de pressions n'accepterait de perdre plus de 10% de son revenu avec le changement de tarification, on peut schématiser la décision du producteur comme une minimisation des sorties de l'état, sous la contrainte que chacun des groupes ne perde plus de 10% de son revenu agricole. La pression sociale des producteurs de luzerne gros consommateurs d'eau profiterait alors aux autres, et on aurait un transfert positif vers les producteurs de la région de l'ordre de 43 millions de Pesos annuellement ;

9.4 Conclusion : encore quelques écueils de taille

Malgré l'absence d'instruments parfaits de gestion de la demande, nous avons voulu montrer qu'une combinaison « bien dosée » des différents instruments économiques, institutionnels et de changement technique à la disposition du décideur politique permettrait d'établir une gestion efficace de la demande en eau du secteur agricole, tout en préservant les producteurs les plus vulnérables, au nom d'une certaine justice sociale.

Comme le titre de cette section, le sous-entend cependant, cette combinaison présente encore un certain nombre d'inconnues car toute l'efficacité de la politique réside dans le dosage des différents ingrédients ! Trouver le bon dosage requiert donc qu'un certain nombre de conditions nécessaires soient

³A titre indicatif, le budget d'opération (hors salaires des chercheurs et techniciens) de l'institut de recherche agronomique pour l'état de Guanajuato est de l'ordre de 15 millions de Pesos. Une restitution plus forte pourrait donc être envisagée afin de ne pas trop pénaliser les productions fourragères.

remplies.

La décentralisation nécessaire des décisions Les niveaux relatifs des tarifs électriques et des remises sont étroitement liés aux conditions de l'aquifère que l'on cherche à gérer. Hors les décisions de tarification sont prises à un niveau très centralisé, qui ne prendra pas en compte l'hétérogénéité des situations.

Cette non-prise en compte de l'hétérogénéité des conditions des aquifères risque donc de créer des transferts monétaires entre producteurs des différents aquifères, selon les mêmes mécanismes que nous avons observé entre producteurs d'un même aquifère. On risque donc de pénaliser inutilement certains producteurs dans des régions où la ressource n'est pas dégradée, pour éviter des problèmes dans les régions où celle-ci est dégradée.

Il reste donc à imaginer un système de tarification décentralisée gérée par une institution très ...centralisée ! Cette tarification suppose donc une nouvelle organisation administrative décentralisée qui risque d'être coûteuse. On rentre alors encore dans les questions de recherche de solution de type « second best ».

Un outil nécessairement évolutif, mais ... Nous avons présenté ici l'outil dans sa version statique. Il est clair cependant que l'outil aura un impact sur la dynamique d'évolution des nappes. Un compromis trouvé aujourd'hui ne sera donc plus forcément idéal dans quelques années si le niveau des nappes a évolué.

Le niveau de la taxation et des remises devrait donc être flexible et renégociable en fonction de l'évolution du milieu physique. Le risque est grand cependant de voir s'installer la remise vers le secteur agricole comme une rente de situation âprement défendue par le secteur agricole par la suite, même si celle-ci s'avérerait plus justifiée par la suite⁴.

La négociation de tous les dangers ... La tarification électrique avec restitution est un instrument qui nécessite un calibrage fin, car elle permet selon les niveaux respectifs du prix de l'électricité et du montant de la remise,

⁴Là encore, toute ressemblance avec des faits ayant existé ne serait pas fortuite !

d'avantager tel secteur au dépens de l'autre, ou tel type d'agriculture au dépens d'une autre.

On imagine donc que le pouvoir de négociation de l'Etat lui-même, mais aussi des différents secteurs d'une part, et des différents types d'acteurs au sein du secteur agricole d'autre part, aura une influence certaine sur les choix de politique finalement adoptés.

Le compromis politique trouvé risque donc de représenter plus un « optimum politique » représentatif des forces en présence qu'un optimum économique. Le pouvoir du chercheur en ce domaine reste relativement limité, mais il est certain que la dissémination de l'information sur les enjeux de la négociation et des outils d'évaluation aux différents groupes qui négocieront seront importants.

Chapitre 10

Conclusion générale

Au sein d'une région d'agriculture intensive du centre du Mexique, un déséquilibre entre offre et demande induit, depuis quelques décades, une baisse continue du niveau des nappes. Cela provoque une augmentation générale des coûts d'extraction de la ressource qui affecte non seulement l'agriculture irriguée de la zone, mais également les autres secteurs de la société. De même, la qualité des eaux extraites commence à montrer des signes de dégradation (salinité). Dans ce contexte, les autorités cherchent un moyen de limiter la dynamique actuelle de surexploitation.

La majorité des prélèvements sur les nappes est imputable à l'agriculture, mais la demande des autres secteurs est en forte croissance. L'objectif des autorités est donc de réduire la consommation brute globale des systèmes de production agricoles. Cette réduction de la consommation brute servira à diminuer la pression sur les nappes d'une part, mais également à procéder à une réallocation des extractions en faveur des autres secteurs. Nous ne nous sommes pas intéressés ici à l'allocation de cette ressource entre les différents secteurs.

Le travail présenté ici est dédié à l'étude de l'impact des instruments de gestion de la demande en eau sur les systèmes de production. Nous avons retenu les divers instruments, parfois complémentaires, de gestion de la demande envisagés par les autorités : d'une part, les instruments économiques (tarification, quotas, subventions), et l'offre technologique avec l'introduction de techniques au potentiel intéressant en termes d'économie d'eau et adaptable aux conditions d'organisation des puits collectifs d'autre part. Par

ailleurs, une part importante est laissée à l'impact de la configuration institutionnelle des puits collectifs (règles collectives) sur les résultats des différents instruments politiques.

Les points saillants de l'étude

Un outil de modélisation de la propriété collective

La démarche adoptée procède en trois étapes : acquisition des données sur le terrain, construction de modèles de puits collectifs et exploration par la simulation des différents instruments à l'étude.

Elle repose donc largement sur la caractérisation puis la modélisation des systèmes irrigués. Ces systèmes irrigués, considérés au sens Ostromien du terme, comportent l'ensemble des infrastructures physiques, des producteurs utilisateurs d'eau, ainsi que les règles collectives, explicites ou non, qui permettent au système de fonctionner.

La prise d'information se situe à deux niveaux distincts mais en interactions : le système irrigué et son fonctionnement global (infrastructures physiques, composition du groupe, et règles de gestion) et les systèmes de production qui les composent. Diverses enquêtes ont permis l'exploration progressive de ces deux niveaux. Une première enquête de type systèmes agraires a permis l'identification des différents systèmes de production et de leurs sources d'approvisionnement en eau. Une enquête ultérieure, se focalisant sur les puits collectifs, a permis d'identifier les différents types et mode d'organisation des puits collectifs. Enfin, une enquête spécifique sur les systèmes de production au sein des puits collectifs a permis d'affiner les résultats de l'enquête systèmes agraires.

La construction des modèles reprend ces deux niveaux d'analyse. Une composante importante du modèle s'intéresse au système de production « pris isolément » du reste du système irrigué qui l'englobe. Dans ce cas de figure, le producteur opère ses choix en fonction de ses propres facteurs, des règles collectives qui sont vues comme des contraintes, et du comportement attendu des autres producteurs.

Une deuxième étape consiste à agréger les différents systèmes de production en un modèle de système irrigué. L'agrégation oblige le modélisateur à

faire des hypothèses sur la gestion par les producteurs des interactions stratégiques, qui sont une des caractéristiques de la *propriété collective*. Dans la littérature, on trouve majoritairement deux approches. La première consiste à supposer une coopération parfaite entre les producteurs. On maximise alors une fonction d'utilité collective, chaque producteur gardant des contraintes individuelles, ce qui permet d'obtenir l'équilibre socialement efficient. La deuxième, consiste à aborder la propriété collective par le biais de la modélisation multi-agents. Les agents sont alors dotés d'une rationalité limitée et où les aspects économiques sont, au mieux, abordés par un jeu de règles *ad-hoc*.

Notre approche, complémentaire des deux approches précédentes, conserve cependant l'hypothèse de rationalité économique, et d'information parfaite des agents, mais permet également d'aborder les interactions stratégiques entre les producteurs. Dans ce cadre, la programmation mathématique nous a permis de détailler suffisamment les choix de productions, les contraintes individuelles et collectives des producteurs, ainsi que les règles collectives instaurées au sein des groupes.

Deux types de comportement sont donc modélisés et comparés. Le premier est un comportement socialement optimal : chaque producteur participe à l'obtention d'un objectif commun, sorte de « tous pour un », sans se soucier des transferts de revenu internes ultérieurs. Les deuxième est un comportement non-coopératif de la part de tous les producteurs du groupe : « chacun pour soi ».

La modélisation de groupes non-coopératifs repose sur les algorithmes de résolution des problèmes MCP (*Mixed Complementarity Problems*). L'idée principale est que chaque producteur maximise simultanément une fonction d'utilité individuelle, dont certains des arguments sont déterminés par les choix des autres producteurs. L'intuition générale de la méthode employée est que, au problème initial d'optimisation on substitue les conditions de premier ordre pour l'obtention d'un optimum. Comme nous recherchons l'extremum d'une fonction sous contraintes en forme d'inégalités, ces conditions sont celles de Kuhn et Tucker (nous avons employé le terme KKT, plus usité dans la littérature rencontrée). Ces conditions comprennent l'annulation de la dérivée première du Lagrangien du problème, auxquelles s'ajoutent les relations d'exclusion. La résolution des optimisations simultanées des diffé-

rents producteurs devient équivalente au système d'inéquations constitué de l'ensemble des conditions KKT des différents producteurs. On transforme donc un problème d'optimisations simultanées en la résolution d'un système d'inéquations avec contraintes de complémentarité (après avoir vérifié les contraintes de qualification).

Cet outil, déjà utilisé dans la littérature sur les marchés oligopolistiques a été adapté à notre problème de gestion d'un bien, un droit d'extraction d'eau, en propriété collective. Nous en avons, nous l'espérons, démontré l'utilité ici, car il permet de décrire de manière détaillée les interactions stratégiques entre les producteurs, au-delà de modèles analytiques stylisés. L'univers des stratégies de chacun des producteurs est ici très large car il inclut les choix sur la superficie irriguée, les cultures implantées et les pratiques d'irrigation employées.

Rôle des institutions : une perspective quantitative

Cet exercice de modélisation apporte une perspective quantitative et empirique relativement originale au débat sur le rôle des organisations et des institutions dans la lutte contre la dégradation des ressources naturelles.

Les simulations de ces puits, dans un cadre coopératif puis non-coopératif, nous permettent d'identifier les inefficiences qu'engendrent certains cadres institutionnels. Les comparaisons entre les différents types d'équilibres nous donne alors une idée *quantifiée* des enjeux d'un travail sur les institutions au sein des puits, tant en termes de consommation en eau que de distribution de la ressource et des revenus.

Dans notre cas de figure, que nous ne pourrions généraliser trop rapidement à d'autres types de ressources ou à d'autres configurations, le travail sur les institutions semble avoir un impact plus important en termes d'équité et de justice, qu'en termes d'efficacité et d'efficience de l'utilisation de l'eau. Aux tarifs électriques pratiqués actuellement, les gains attendus en termes d'efficience de l'utilisation de l'eau sont relativement faibles. En revanche, elle aurait un effet plus important sur la répartition des quantités d'eau utilisées par les différents membres, l'eau étant redirigée vers les producteurs les plus efficaces.

Cependant, dans notre cas, l'importance des institutions (règles collec-

tives) sur la consommation en eau dépend également de l'état de dégradation de la ressource, et de la configuration des groupes. Plus la nappe est profonde, plus la surconsommation engendrée par la non-coopération sera importante. L'intérêt de travailler avec les groupes sur les règles collectives dépendra donc fortement de conditions spécifiques, et il est difficile de tirer une leçon générale.

Une réhabilitation de l'instrument tarifaire

La tarification est l'instrument requis si l'on veut transmettre un signal de rareté aux utilisateurs d'eau. Cependant, la tarification ne provoque un ralentissement de la demande qu'avec des augmentations de tarifs prohibitifs. Bien que les tarifs requis varient avec la configuration du groupe et l'état de la nappe, nos simulations montrent qu'une augmentation moyenne de 300% des tarifs actuels serait nécessaire pour amener les producteurs à réduire de 30% leur consommation en eau d'irrigation. Ce type de tarif engendre des pertes de revenus importantes chez tous les types de producteurs allant de 15 à 77% par rapport au revenu actuel. Par ailleurs, les effets de la tarification sur les revenus sont plus importants chez les producteurs dont la ressource est la plus dégradée, et donc ceux qui tiraient déjà un revenu moins important que les autres des superficies qu'il cultive. La tarification est donc également vue comme une mesure injuste car plus préjudiciable pour les plus pauvres. De nombreux auteurs ont donc conclu à la non-faisabilité politique de telles mesures.

Nous avons cependant montré que l'utilisation de l'instrument tarifaire (tarification uniforme) couplé avec un système de remise fixe par unité de superficie équipée permettait d'éliminer les principaux arguments en défaveur de la tarification. Le système, nous le rappelons, consiste à augmenter le prix de l'électricité de manière suffisante pour que les producteurs réduisent leur consommation (sans se préoccuper des effets sur les revenus). Les revenus perçus par l'Etat sont ensuite redistribués aux producteurs sous une forme découplée de la consommation (remise fixe par ha). Cette redistribution vers les producteurs permet, d'une part, de ne pas fragiliser l'agriculture irriguée déjà malmenée. Elle permet également un transfert de revenus des gros consommateurs d'eau vers les petits consommateurs. En ce sens, elle ne

pénalise pas outre mesure les revenus des producteurs dont la ressource est en voie d'épuisement, tout en leur envoyant un signal de rareté adéquat.

D'un point de vue plus large, elle change la perspective de gestion de la demande en passant d'une doctrine de type « pollueur-payeur » vers une doctrine de type « polluer-payé pour arrêter de polluer ».

Une place pour le changement technique ?

Les systèmes irrigués que nous avons étudié, du fait de leur caractère collectif, ne disposent pas d'un nombre très important d'options techniques. Par exemple, les systèmes d'arrosage par aspersion ou localisés (goutte à goutte) s'intègrent difficilement dans les systèmes étudiés, car ils supposent une organisation du travail et une coordination entre les producteurs plus importante que celle actuellement réalisée.

En revanche, l'introduction de techniques à base de semis direct semble apporter une solution intéressante pour les producteurs, tant en terme de compétitivité que de consommation en eau. Notons cependant, que de nombreux ajustements sont encore nécessaires pour permettre l'appropriation des concepts du semis direct par les producteurs de la région.

Etant donné les coefficients techniques obtenus à ce jour, les simulations que nous avons effectuées montrent que l'introduction du semis direct permettrait des économies en eau substantielles, et que le caractère collectif des puits ne génère pas de blocage particulier à l'adoption. En d'autres termes, au prix actuel de l'électricité, les interactions stratégiques entre les producteurs ne sont pas à l'origine de la non-adoption du semis direct.

Néanmoins, le semis direct à lui seul ne permet d'atteindre les objectifs de réduction de la consommation en eau par l'agriculture. L'introduction du semis direct doit être combinée avec d'autres instruments de gestion de la demande.

Les interactions entre les différents outils sont cependant à explorer en détail. Ainsi, avec l'adoption du semis direct, les systèmes de production sont plus résilients aux politiques de prix de l'électricité envisagées. Les augmentations de tarifs électriques nécessaires pour atteindre les objectifs de réduction fixés sont donc plus importantes quand on introduit simultanément le semis direct. Cet exemple nous montre donc que les interactions entre les différents

instruments doivent donc être étudiées avec précaution, avant de les lancer simultanément.

Et si on poursuivait...

Un modèle de producteur plus simple, mais des interactions stratégiques plus complexes

Comme mentionné précédemment, nous avons développé un modèle qui représente un certain compromis entre complexité des choix individuels et complexité des interactions stratégiques entre les producteurs. Le compromis adopté ici fait la part belle aux choix individuels et est relativement limité en ce qui concerne les interactions stratégiques. Le gain sur le réalisme des choix des producteurs se fait au détriment des situations stratégiques. En effet, nous nous sommes limité à un cadre statique (une seule période), donc sans répétitions, et où l'information des producteurs est parfaite (je sais tout, et que tu sais tout, et que tu sais que je sais tout ...). Ensuite, nous avons également limité le nombre de producteurs en interactions à un nombre relativement faible.

Les caractéristiques de l'outil étant maintenant en place, il serait intéressant de diminuer la complexité du modèle d'exploitation (pour n'en garder que les aspects les plus déterminants), pour complexifier l'aspect des interactions stratégiques : plus de producteurs, répétition des interactions, mise en perspective dynamique pour analyser les externalités inter-temporelles entre producteurs,

Vers l'économie politique du changement ?

Au niveau des aquifères

Les simulations montrent qu'un certain nombre d'options sont envisageables pour le décideur politique : tarification, quotas, changement technique, travail sur les institutions, etc. pour atteindre les objectifs de réduction de la demande agricole. Néanmoins, ces différentes options ont des implications radicalement différentes en termes de revenus pour les différents groupes de producteurs et pour les différents secteurs de la société.

On perçoit bien qu'il subsiste une grande marge de manœuvre pour la négociation politique. En effet, les choix effectués auront un impact sur d'une part sur le niveau de la ponction réalisée sur le secteur agricole et, d'autre part, sur les transferts réalisés entre les différents utilisateurs. Les rapports de force entre les différents secteurs d'une part, et les différents types de consommateurs d'autre part influenceront donc fortement la décision politique finale.

Notre mission, en tant qu'économiste est d'informer au mieux les différentes parties prenantes, afin de diminuer les asymétries d'information au moment de la négociation. Ce type d'analyse, porté au niveau des aquifères permettrait d'alimenter de manière concrète les débats au niveau des structures de concertation se mettant en place au niveau des aquifères de la région comme les COTAS.

Au niveau des puits collectifs

Aux tarifs de référence de l'électricité, nous avons observé une divergence relativement faible entre les choix coopératifs et non-coopératifs. Cependant, avec l'augmentation progressive des tarifs électriques enclenchée par le gouvernement, les simulations nous indiquent une divergence croissante entre les deux modes de fonctionnement.

Du fait des tensions nouvelles créées par l'augmentation des tarifs électriques, un travail d'accompagnement des négociations des règles au sein des puits collectifs semble approprié. La non-coopération entre les producteurs engendre des pertes croissantes du revenu collectif, et une efficacité amoindrie des politiques tarifaires. Là-encore, le modèle peut servir d'intrants de base à la négociation, en montrant les tenants et les aboutissants de la non-coopération.

Il est clair que les deux situations types modélisées constituent, en quelque sorte, les bornes des systèmes modélisés. L'outil viendrait donc en complément d'outils de négociation maintenant devenus classiques comme les jeux de rôles et les SMAs.

Changement d'échelle spatio-temporelle

Travail sur la dynamique d'évolution des nappes

Nous avons volontairement limité notre étude à l'échelle des puits collectifs et aux interactions stratégiques entre producteurs d'un même puits. Notre souci principal était, rappelons-le, l'impact de mesures visant une réduction de la consommation brute en eau d'irrigation des systèmes de production agricoles.

Pour les systèmes céréaliers, la réduction de la demande agricole passe par deux phases successives : une première phase d'adaptation des systèmes de production sans réduction des superficies irriguées, une deuxième phase d'abandon progressif de l'agriculture irriguée durant le cycle d'hiver. Pour les autres systèmes, seule la réduction des superficies cultivées permet d'atteindre les objectifs visés.

Pour un aquifère fermé, nous avons vu que l'impact de ces deux phases sur la dynamique d'évolution des nappes est fondamentalement différent. De même, nous avons vu que l'introduction du semis direct comme nouvelle option technique, par une diminution de l'évaporation aurait un impact spécifiquement différent sur la dynamique des nappes.

Si l'on recherche une réelle diminution de long terme des extractions nettes de l'aquifère, on devra rechercher une réduction des superficies irriguées au moins durant le cycle d'hiver, ou à surface constante, diminuer la composante évaporation (semis direct).

Il serait opportun d'élargir maintenant le travail réalisé à l'échelle du puits collectif au niveau du bassin et de raisonner en termes de prélèvements nets sur les nappes plutôt que de prélèvements bruts. Cela impliquerait alors un travail avec les autres disciplines pour approfondir et questionner les objectifs fixés.

Travail au niveau de l'aquifère

L'aspect dynamique nous permettrait de prendre en compte les externalités entre puits collectifs qui ont été ignorées jusqu'ici. Dans le cas d'un aquifère en propriété commune, deux types d'externalités entrent en jeu. Tout d'abord, on observe les externalités sur les coûts de pompage : les prélève-

ments d'un producteur font diminuer le niveau de la nappe et induisent une augmentation des coûts d'extraction au niveau de tous les autres puits. Ensuite, on observe les externalités stratégiques (parfois également appelées de préemption stratégiques) : ce qu'un agent n'extrait pas aujourd'hui pourra être extrait, au moins en partie, par un autre agent. La peur de ne plus pouvoir pomper demain, ce que l'on a pas extrait aujourd'hui réduirait les incitations à économiser de l'eau pour des utilisations futures.

Dans notre cas, il serait intéressant de quantifier l'impact des deux types d'externalités sur les comportements des puits de la région. Cela nécessiterait l'élaboration d'un modèle dynamique d'extraction avec rétroactions. Les études menées jusqu'alors ont utilisé la théorie des jeux différentiels pour analyser l'effet des externalités sur la dynamique de la nappe. Il serait intéressant de reprendre ce type d'étude formalisé à l'aide de fonction de production et en l'absence de contraintes, avec des outils permettant une représentation plus réaliste des choix de production et des contraintes de producteur à ce niveau. Les outils utilisés dans ce travail pourraient alors être mobilisés à l'échelle d'un bassin.

Références bibliographiques

Allais, M. (1953). Le comportement de l'homme rationnel devant le risque : critique des postulats et axiomes de l'école américaine. *Econometrica* **21**(4) : 503-546.

Allan, J. A. (1996). Water use and development in arid regions : environment, economic development and water resource politics and policy. *Water Use and Development* **5** : 107-115.

Anderson, J. R. et J. B. Hardaker (2002). Risk aversion in economic decision making : Pragmatic guides for consistent choice by natural resource managers. In. Risk and Uncertainty in Environmental and Resource Economics, Wageningen International Conference Centre, The Netherlands.

Apland, J. et G. Hauer (1993). Discrete stochastic programming : concepts, exemples and review of empirical applications, Staff Paper P93-21. St. Paul, Minnesota, USA, Department of agricultural and applied economics, College of Agriculture, University of Minnesota.

Arrow, K. J. (1971). *Essays in the theory of risk bearing*. Chicago, Markham Publishing

Arthur, W. B. (1989). Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical events. *The Economic Journal* **99**(March 1989) : 116-131.

Arthur, W. B. (1999). Les rétroactions positives en économie. *Pour la Science. Dossier : Les mathématiques sociales*(Juillet 1999) : 114-119.

Atwood, J. (1985). Demonstration of the use of lower partial moments to improve safety-first probability limits. *American Journal of Agricultural Economics* **67**(4) : 787-793.

Baland, J.-M. et J.-P. Platteau (1996). *Halting degradation of natural resources : is there a role for rural communities*. 2nd edition. Oxford, Oxford University Press : pp. 423.

Banco Mundial et Comisión Nacional del Agua (1999). Políticas opcionales para el manejo de la sobreexplotación de acuíferos en Mexico. Estudio Sectoral. Guanajuato, Banco Mundial, Comisión Nacional del Agua.

Barbier, B. (1994). Modélisation agronomique et économique de la durabilité d'un système agraire villageois. Le cas du village de Bala au Burkina Faso. Thèse de Doctorat en Economie. Montpellier, France,, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier : pp. 329.

- Barker, R., D. Dawe et A. Inocencio (2003). Economics of water productivity in managing water for agriculture. In : J. W. Kijne, R. Barker and D. Molden (Eds). *Water productivity in agriculture : limits and opportunities for improvement*. Wallingford (UK), CAB International : 19-35.
- Baron, C., P. Perez et F. Maraun (1996). Guides d'utilisation de SARRAMET, SARRABIL, SARRAZON. Montpellier, CIRAD.
- Barreteau, O. et F. Bousquet (2000). SHADOC : a Multi-Agent Model to tackle viability of irrigated systems. *Annals of Operations Research* **94** : 139-162.
- Barry, E. (2001). Premiers éléments sur la dynamique d'évolution des systèmes de production du Bajío Guanajuatense. Diplôme d'Ingénieur Agronome. Toulouse,, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse : pp. 61 + Annexes.
- Baumol, W. J. (1963). An expected gain-confidence limit criterion for portfolio selection. *Management Science* **16**(1) : 174-182.
- Bénard, D. (2001). Contributions à la clarification des objectifs d'un projet de Recherche/Développement au Mexique : propositions pour la mise en place d'un dispositif de suivi-évaluation. DESS. Paris,, Université Paris XII.
- Berbel, J. (1988). Target returns within risk programming models : a multi-objective approach. *Journal of Agricultural Economics* **39**(2) : 263-270.
- Berbel, J. (1989). Analysis of protected cropping : an application of multi-objective programming techniques to Spanish agriculture. *European Review of Agricultural Economics* **16**(2) : 203-216.
- Berbel, J. (1993). Risk programming in agricultural systems : a multiple criteria analysis. *Agricultural Systems* **41**(3) : 275-288.
- Berck, P. et G. Helfland (1990). Reconciling the von Liebig and differentiable crop production functions. *American Journal of Agricultural Economics* **72**(4) : 985-996.
- Bhatia, B. (1992). Lush fields and parched throats : the political economy of groundwater in Gujarat. *Economic and Political Weekly* **27/51**(2) : A-142-170.
- Binswanger, H. P. et V. W. Ruttan, Eds. (1978). *Induced innovation : technology, institutions and development*. Baltimore, USA, John Hopkins University Press.
- Blancard, S., J.-P. Boussemart et K. Kerstens (2003). L'influence des contraintes de financement de court terme sur le profit des exploitations agricoles : une approche non paramétrique. *Economie et Prévisions* **3**(159) : 71-82.
- Boland, J. J. et D. Whittington (2000). The political economy of water tariff design in developing countries : increasing block tariffs versus uniform price with rebate. In : A. Dinar (Ed.). *The political economy of water pricing reforms*. Oxford, Oxford University Press : 105-120.
- Bontemps, C. et S. Couture (1999). Dynamics and uncertainty in environmental and natural resource management under scarcity : the case of irrigation. In. American Agricultural Economics Association - 1999 Annual Meeting, Nashville (USA).

- Bontemps, C., S. Couture et P. Favard (2001). Is the water demand curve really convex? FEEM series, 82.2001. Milan, Italy, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Borenstein, S. et J. Bushnell (1997). An empirical analysis of the potential for market power in California's electricity industry. In. Conference on Electricity Restructuring.
- Bos, M. G. et W. Walters (1990). Water Charges and Irrigation Efficiencies. *Irrigation and Drainage Systems* **4** : 267-278.
- Bouquet, E. (1999). Mercados de tierras agrícolas en Tlaxcala. Formalidad e informalidad del cambio institucional. *Estudios Agrarios (MEX)* **11** : 67-106.
- Bousquet, F. (1994). Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multiagents. Le cas de la pêche dans le Delta Central du Niger. Thèse de Doctorat. Lyon, Lyon I, Université Claude Bernard.
- Boussard, J.-M. (1997). La prise en compte du risque dans la gestion de l'eau d'irrigation. *Options Méditerranéennes*(31) : 147-159.
- Boussard, J. M. et J. J. Daudin (1988). *La programmation linéaire dans les modèles de production*. Paris, Masson-INRA : pp. 127.
- Boussemart, J. P., G. Flichman, F. Jacquet et H. B. Lefer (1995). L'apport des modèles bioéconomiques à l'analyse des politiques agricoles. Une illustration sur la Beauce et la région de Toulouse. In. Journées IFRESI.
- Bouzaher, A., P. G. Lakhminarayan, R. Cabe, A. Carriquiry, P. W. Gassman et J. F. Shrogen (1993). Metamodels and nonpoint pollution policy in agriculture. *Water Resources Research* **29**(6) : 1579-1587.
- Bouzit, A. M. (1995). Apport du modèle d'utilité anticipée à l'analyse de l'attitude des exploitants agricoles face au risque. *Economie Rurale*(227) : 28-33.
- Bower, J., D. W. Bunn et C. Wattendrup (2001). A model-based analysis of strategic consolidation in the German electricity industry. *Energy Policy* **29** : 987-1005.
- Bromley, D. W. (1991). *Environment and economy : property rights and public policy*. Oxford, UK, Blackwell
- Bromley, D. W. (2000). Property regimes and pricing regimes in water resource management. In : A. Dinar (Ed.). *The political economy of water pricing reforms*. Oxford, Oxford University Press : 29-48.
- Brooke, A., D. Kendrick, A. Meeraus et R. Raman (1998). *GAMS : a user's guide*. Washington D.C., GAMS Development Corporation : pp. 262.
- Brundland, G., Ed. (1987). *Our common future : The World Commission on Environment and Development*. Oxford, Oxford University Press.
- Buccola, S. T. et A. Subaei (1984). Mean-Gini analysis, stochastic efficiency and weak risk aversion. *Australian Journal of Agricultural Economics* **28**(2/3) : 77-86.
- Buschena, D. E. et D. Zilberman (1994). What do we know about decision making under risk and where do we go from there? *Journal of Agricultural Resource Economics* **19**(2) : 425-445.

- Carey, J. M. et D. Zilberman (2002). A model of investment under uncertainty : modern irrigation technology and emerging markets in water. *American Journal of Agricultural Economics* **84**(1) : 171-183.
- Carrère, V. (2001a). Mise en évidence des différents systèmes de production agricole de la zone du Bajío Guanajuatense. DESS. Paris, Institut d'Etude du Développement Economique et Social (IEDES), Université Paris I : pp. 162 + annexs.
- Carrère, V. (2001b). Mise en évidence des différents systèmes de production agricole de la zone du Bajío Guanajuatense, Etat de Guanajuato Sud, altiplano Mexicain. DESS - Développement Agricole. Paris, IEDES, Université Paris I Panthéon - Sorbonne / INA-PG : pp. 161 pp. + annexes.
- Carter, R. C. et P. Howsam (1994). Sustainable use of groundwater for small scale irrigation with special reference to sub-Saharan Africa. *Land Use Policy* **11**(4) : 275-285.
- Caswell, M., E. Lichtenberg et D. Zilberman (1990). The effects of pricing policies on water conservation and drainage. *American Journal of Agricultural Economics* **72**(4) : 883-890.
- Caswell, M. F. et D. Zilberman (1986). The effects of well depth and land quality on the choice of irrigation technology. *American Journal of Agricultural Economics* **68**(4) : 798-811.
- CEAG (1999). Plan estatal hidraulico de Guanajuato 2000-2025. Fase I : Diagnostico de la situacion hidraulica del estado de guanajuato, fase II : Estrategia estatal en materia de agua. Guanajuato, Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.
- CEAG (2000). Estudios hidrogeológicos y modelos matemáticos de los acuíferos del Estado de Guanajuato. CD-ROM. Guanajuato, Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.
- Chiang, A. C. (1984). *Fundamental methods of mathematical economics*. 3rd Edition. New York, McGraw-Hill : pp. 788.
- Chohin-Kuper, A., T. Rieu et M. Montgignoul (2002). Les outils économiques pour la gestion de la demande en eau en Méditerranée. Série Irrigation "Rapports" 2002-06, 1081. Montpellier, CEMAGREF.
- Chuang, A. S., F. Wu et P. Varaiya (2001). A game-theoretic model for generation expansion planning : problem formulation and numerical comparisons. *Transactions on power systems* **16**(4) : 885-891.
- CIMMYT (2002). EconBase database, CIMMYT Economics Program. ([http :148.223.253.103](http://148.223.253.103), last update : 01/02/2001).
- Comision Nacional del Agua (1999). El manejo sostenible y productivo de los acuíferos en México. In. Taller de Políticas Opcionales para el Manejo de la Sobreexplotación de Acuíferos en Mexico, Mexico, CNA / Banco Mundial.
- Conrad, J. M. (1999). *Resource Economics*. 1st edition. Cambridge, Cambridge University Press : pp. 213.

- Consejo Nacional de Población (1998). Remesas : monto y distribución regional en Mexico. Mexico, D.F., Consejo Nacional de Poblacion : 10.
- Consejo Nacional de Población (2000). *Migración México-Estados Unidos. Presente y futuro*. Primera Edición. Mexico, D.F., Consejo Nacional de Población : pp. 162.
- Cowan, R. et P. Gunby (1996). Sprayed to death : path dependence, lock-in and pest control strategies. *The Economic Journal* **106**(436) : 521-542.
- Cowan, R. et N. Jonard (2003). The dynamics of collective invention. *Journal of Economic Behavior and Organization* **52**(4) : 513-532.
- Damania, R. (2002). Environmental controls with corrupt bureaucrats. *Environment and Development Economics* **7**(3) : 407-427.
- Darbera, R. (2000). Instruments d'inflexion du parc automobile vers des véhicules moins contributeurs d'émissions de CO₂. In. Séminaire de recherche du programme Gestion et impacts du changement climatique (L'aménagement durable du territoire), Paris, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Day, C. (1999). A computational approach to modelling strategic behaviour in electric power pools. PhD Thesis. London,, London Business School.
- de Fraiture, C. et C. Perry (2002). Why is irrigation water demand inelastic at low price ranges? In. Irrigation water policies : micro and macro considerations, Agadir, Morroco, World Bank.
- Deybe, D. (1993). Politiques pour une agriculture durable. Essai sur la gestion des ressources naturelles renouvelables. Thèse pour le Doctorat en Science Economique,, Université de Paris I : pp. 264.
- Dinar, A. et J. Letey (1996). *Modeling economic management and policy issues of water in irrigated agriculture*. Westport, Praeger Publishers : pp. 241.
- Dinar, A., J. D. Rhoads, P. Nash et B. L. Waggoner (1991). Production functions relating crop yield, water quality and quantity, soil salinity and drainage volume. *Agricultural Water Management* **19**(51-66).
- Dinar, A., M. W. Rosegrant et R. Meinzen-Dick (1997). Water allocation mechanisms-principles and examples. Working Papers – Environment. Pollution, biodiversity, air quality. Washington, D.C., World Bank.
- Donaldson, A. B., G. Flichman et J. P. G. Webster (1995). Integrating agronomic and economic models for policy analysis at the farm level : the impact of CAP reform in two european regions. *Agricultural Systems* **48**(2) : 163-178.
- Doorenbos, J. et A. H. Kassam (1987). Réponse des rendements à l'eau. Bulletin FAO Irrigation et Drainage, 33. Rome, FAO.
- FAO (1992a). CROPWAT : a computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper, 46. Rome, Food and Agriculture Organization.
- FAO (1992b). Water for sustainable food production and rural development - UN-CED agenda : Targets and cost estimates. Rome, FAO.

FAO (2000). Problem soils database, FAO,. (<http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agl/agll/prosoil/verti.htm>, last update : 21/08/2000).

Faysse, N. (2001a). L'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs. Des petits périmètre irrigués tunisiens aux prélèvements en rivière dans le Bassin de l'Adour. Thèse de Doctorat. Nanterre, Economie, Université Paris X : pp. 265.

Faysse, N. (2001b). Que dit la théorie économique sur la gestion des ressources en bien commun ? Les différents outils et les avancées récentes.

Faysse, N. (2002). L'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs. Lecture des choix d'assolement d'un périmètre irrigué. In : P. Garin, P. Y. L. Gal and T. Ruf (Eds). *La gestion des périmètres irrigués collectifs à l'aube du XXIème siècle : enjeux, problèmes, démarches. Actes de l'atelier du PCSI, 22-23 Janvier 2001, Montpellier ; France*. Montpellier, CIRAD : 85-107.

Ferber, J. (1997). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. Paris, InterEditions : pp. 522.

Ferris, M. C. et T. S. Munson (2003). PATH 4.6, GAMS Development Corporation.

Ferris, M. C. et J. S. Pang (1997). Engineering and economic applications of complementarity problems. *Siam Review* **39**(4) : 669-713.

Ferris, M. C. et K. Sinapiromsaran (1998). Formulating and solving Nonlinear Programs as Mixed Complementarity Problems, Mathematical Programming Technical Report 98-21.

Flichman, G. (1995). Politique économique et pollution par des nappes par les nitrates en Europe. In. Académie d'Agriculture de France, Paris.

Flichman, G. et D. Jourdain (1998). Economic policy and water pollution. In : G. A. A. Wossink, G. C. van Kooten and G. H. Peters (Eds). Symposium of the International Association of Agricultural Economists : Economics of Agrochemicals. An international overview of use patterns, technical and institutional determinants, policies and perspectives., Wageningen, Netherlands, Ashgate.

Flichman, G., C. Varela-Ortega et A. Garrido (1994). Agricultural policy, choice of technologies and environmental impacts under uncertainty and market imperfections : a regional comparison on Southern Europe. In. IAAE Congress, Harare, Zimbabwe.

Franquin, P. et F. Forest (1977). Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agronomie Tropicale* **32**(1) : 7-11.

Freund, R. J. (1956). The introduction of risk into a programming model. *Econometrica* **24**(3) : 253-263.

Gayant, J.-P. (1995). Généralisation de l'espérance d'utilité en univers risqué, représentation et estimation. *Revue économique* **46**(4) : 1047-1061.

Gérard, F., J.-M. Boussard et D. Deybe (1994). MATA : prototype for Indonesian modelling. Document de travail. Paris, CIRAD-URPA.

- Gibbons, R. (1992). *Game theory for applied economists*. Princeton, Princeton University Press : pp. 267.
- Gillet, V. et I. Ollivier (2002). Evolution des règles de gestion de l'eau superficielle et souterraine et impact du transfert. Master of Science. Montpellier, Gestion Sociale de l'Eau, CNEARC : pp. 116 pp. + annexes.
- Gillon, Y., C. Chaboud, J. Boutrais et C. Mullon, Eds. (2000). *Du bon usage des ressources renouvelables*. Paris, IRD Editions.
- Gisser, M. et D. A. Sánchez (1980). Competition versus optimal control in ground-water pumping. *Water Resources Research* **16**(4) : 638-642.
- Gleick, P. H. (1999). A human right to water. *Water Policy* **1**(5) : 487-503.
- Gleick, P. H. (2000). *The world's water 2000-2001 : the biennial report on fresh-water resources*. Washington, D.C., Island Press : pp. 315.
- Goulet, F. (2002). Analyse du fonctionnement des systèmes de culture en zone irriguée au Mexique : le cas du municipio de Valle de Santiago, Etat du Guanajuato. Diplôme d'Ingénieur en Agriculture. Angers,, Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers : pp. 106.
- Guerrero, R. V. (1998). Participacion social en el aprovechamiento sustentable de las aguas subterranas - el caso de Guanajuato.
- Hamal, K. B. et J. R. Anderson (1982). A note on decreasing absolute risk aversion among farmers in Nepal. *Australian Journal of Agricultural Economics* **26**(3) : 220-225.
- Hanoch, G. et H. Levy (1969). The efficiency analysis of choices involving risk. *Review of Economic Studies* **36**(107) : 335-346.
- Hardaker, J. B. (2000). Some issues in dealing with risk in agriculture. Working Paper Series, 2000-3, University of New England (AUS).
- Hardaker, J. B., S. Pandey et L. H. Patten (1991). Farm planning under uncertainty : a review of alternative programming models. *Review of Marketing and Agricultural Economics* **59**(1) : 9-22.
- Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons. *Science*(162) : 1243-1248.
- Hazell, P. B. R. (1971). A linear alternative to quadratic and semivariance programming for farm planning under uncertainty. *American Journal of Agricultural Economics* **53**(4) : 53-62.
- Hazell, P. B. R. et R. D. Norton (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. New York, Macmillan Publishing Company : pp. 400.
- Heady, E. O. et J. L. Dillon (1972). *Agricultural production functions*. Ames, Iowa State University Press
- Hexem, R. W. et E. O. Heady (1978). *Water production functions for irrigated agriculture*. Ames, Iowa State University Press
- Hocdé, H. et B. Miranda (2000). *Los intercambios campesinos : más allá de las fronteras. Seamos futuristas !*. San Salvador, CIRAD-GTZ-IICA : pp. 294.

- Hodson, D. P., D. Jourdain, B. Triomphe, J. W. White et H. Garcia Nieto (draft). Application of GIS to the design of sampling strategies for agricultural surveys - a case study for farming practices surveys in Guanajuato, Mexico. Working Paper, CIMMYT.
- International Conference on Water and the Environment (1992). The Dublin statement and report of the Conference. Geneva, World Meteorological Organization.
- Janaud, S. (2003). La gestion de l'eau dans les puits collectifs du Bajío de Guanajuato : analyse et propositions à l'aide d'un modèle de programmation mathématique. Master of Science. Montpellier, IAMM, Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes : pp. 135.
- Jing-Yuan, W. et Y. Smeers (1999). Spatial oligopolistic electricity models with Cournot generators and regulated transmission prices. *Operations Research* **47**(1) : 102-112.
- Johansson, R. C. (2000). Pricing irrigation water : a literature survey. Working Paper, 2449. Washington, D.C., World Bank - Country Economics Department.
- Jones, C. A., P. T. Dyke, J. R. Williams, J. R. Kiniry et V. W. Benson (1991). EPIC : an operational model for evaluation of agricultural sustainability. *Agricultural Systems* **37**(4) : 341-350.
- Jones, W. I. (1995). The World Bank and irrigation. Washington, D. C., The World Bank.
- Jourdain, D. (1999). Introduction du risque dans les modèles de décision : une synthèse bibliographique. Document de Travail du CIRAD-CA, 1-99. Montpellier, CIRAD.
- Jourdain, D., B. Triomphe et J.-M. Arreola Tostado (2001a). Detección de obstáculos y necesidades sobre labranza de conservación. Reporte final del proyecto CIMMYT-FIRA : Preparando la Transición Hacia una Agricultura Sostenible con Base en la Generación, Adaptación Difusión de Sistemas de Labranza de Conservación en México. Mexico, CIMMYT.
- Jourdain, D., B. Triomphe et J.-M. Arreola Tostado (2001b). Differential adoption of direct seeding in Guanajuato, Mexico : a baseline survey. In. Conservation agriculture. A worldwide challenge : 1st World Congress on Conservation Agriculture, Madrid, Spain.
- Jourdain, D. J. (1995). Utilisation des modèles bio-économiques pour l'analyse des stratégies de protection des plantes : faisabilité, problèmes théoriques. DEA Economie du Développement Agricole, Agro-alimentaire et Rural. Montpellier,, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
- Kataoka, S. (1963). Stochastic programming model. *Econometrica* **31**(1-2) : 181-196.
- Klemperer, P. D. et M. A. Meyer (1989). Supply functions equilibria in oligopoly under uncertainty. *Econometrica* **57**(6) : 1243-1277.

- Kloezen, W. H., C. Garcés-Restrepo et S. H. Johnson III (1997). Impact assessment of irrigation management transfer in the Alto Rio Lerma Irrigation District, Mexico. Research Report, 15. Colombo, Sri Lanka, IIMI.
- Knight, F. H. (1921). *Risk, uncertainty and profit*. Boston, Houghton Mifflin Co.
- Komives, K. (1998). Designing pro-poor water and sewer concessions : early lessons from Bolivia. Policy Research Working Paper, 2243. Washington, D.C., World Bank, Private Sector Development Division.
- Lamacq, S. (1997). Coordination entre l'offre et la demande en eau sur un périmètre irrigué. Des scénarios, des systèmes, et des hommes. Thèse de Doctorat. Montpellier,, ENGREF.
- Lambert, D. K. et B. A. McCarl (1985). Risk modelling using direct solution of nonlinear approximations of the utility function. *American Journal of Agricultural Economics* **67**(4) : 846-852.
- Larson, B. A. et D. W. Bromley (1990). Property rights, externalities and resource degradation. *Journal of Development Economics* **33**(2) : 235-262.
- Le Gal, P.-Y., T. Rieu et C. Fall (2003). Water pricing and sustainability of self-governing irrigation schemes. *Irrigation and Drainage Systems* **17** : 213-238.
- León, J.-G. (2002). Méthodologie de recherche de stratégies "robustes" pour des projets d'irrigation communautaires. Diplôme d'Etudes Approfondies de Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental. Montpellier,, ENGREF : pp. 93.
- Letey, J. (1991). Crop water production functions and the problem of drainage and salinity. In : A. Dinar and D. Zilberman (Eds). *The economics and management of water and drainage in agriculture*. Boston, Kluwer Academic Publishers : 209-227.
- Levine, G. et C. Garces-Restrepo (1999). El desempeño de los sistemas de riego y sus implicaciones para la agricultura de riego mexicana. Serie Latinoamericana, 11. Mexico, IWMI.
- Levy, H. et G. Hanoch (1970). Relative effectiveness of efficiency criteria for portfolio selection. *Journal of Finance and Quantitative Analysis* **5**(1) : 63-76.
- Lien, G. et J. B. Hardaker (2001). Whole-farm planning under uncertainty : impacts of subsidy scheme and utility function on portfolio choice in Norwegian agriculture. *European Review of Agricultural Economics* **28**(1) : 17-36.
- LINDO Systems (2001). *LINGO : the modeling language and optimizer*. Chicago, Lindo Systems : pp. 520.
- Lise, W., C. Kemfert et R. S. J. Tol (2003). Strategic action in the liberalised german electricity market. In. European Association of Environmental and Resource Economists 12th Annual Conference, Bilbao, Spain.
- Lunzhang, S. (1994). *Management of groundwater resources in China*. Rome, FAO
- Maan, P. C. et J. A. Beecher (1996). Incremental and average cost methods in rate design. *Journal AWWA* **88** : 34-39.

- Mailhol, J.-C. (1992). Un modèle pour améliorer la conduite de l'irrigation à la raie. *ICID Bulletin* **41**(1) : 43-60.
- Mailhol, J.-C. (2001). Contribution à l'amélioration des pratiques d'irrigation à la raie par une modélisation simplifiée à l'échelle de la parcelle et de la saison. Thèse de Doctorat. Montpellier, Sciences de la terre et de l'eau, Université de Montpellier II : pp. 276 p. + annexes.
- Marañón Pimentel, B. (1999). La gestión del agua subterránea en Guanajuato. La experiencia de los COTAS. *Agraria* **5**(12) : 153-173.
- Marcotte, P. (1988). Un algorithme général de calcul de l'état d'équilibre d'un oligopole. *R.A.I.R.O. Recherche Opérationnelle* **22** : 225-241.
- Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. *Journal of Finance* **7**(Mar. 1952) : 77-91.
- Martinez-Romero, E., D. Hodson, E. Muchugu, H. Garcia et J. W. White (2001). Guanajuato almanach, version 1.0, CIMMYT, INIFAP-Guanajuato, CIRAD. last update : May 2001).
- Merriam, J. L. et J. Keller (1978). Farm irrigation system evaluation : A guide for management. Logan, USA, Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University.
- Molden, D., H. Murray-Rust, R. Sakthivadivel et I. Makin (2003). A water-productivity framework for understanding and action. In : J. W. Kijne, R. Barker and D. Molden (Eds). *Water productivity in agriculture : limits and opportunities for improvement*. Wallingford (UK), CAB International : 1-18.
- Moore, M. R., N. R. Gollehon et D. H. Negri (1993). Alternative forms for production functions of irrigated crops. *The Journal of Agricultural Economics Research* **44**(3) : 16-32.
- Muller, B., B. Lidon et F. Maraun (1998). Etude pragmatique et synthétique d'un projet. In : J.-R. Tiercelin (Ed.). *Traité d'irrigation*. Paris, Lavoisier : 232-256.
- Muller, P.-A. (1997). *Modélisation objet avec UML*. Paris, Editions Eyrolles : pp. 424.
- Murphy, F. H., H. D. Sherali et A. L. Soyster (1986). A mathematical programming approach for determining oligopolistic market equilibrium. *Mathematical Programming* **24**(1) : 92-106.
- Negri, D. H. (1989). The common property aquifer as differential game. *Water Resources Research* **25**(1) : 9-15.
- OCDE (1987). *Tarification des services relatifs à l'eau*. Paris, OCDE
- Oglethorpe, D. R. et J. R. O'Callaghan (1995). Farm-level economic modelling within a river catchment decision support system. *Journal of environmental planning and management* **38**(1) : 93-106.
- Okunev, J. et J. L. Dillon (1988). A linear programming for determining Mean-Gini efficient farm plans. *Agricultural Economics* **2**(3) : 273-285.

- Olson, M. (1965). *The logic of collective action : public goods and the theory of groups*. Cambridge, Harvard University Press
- Ostrom, E. (1990). *Governing the commons : the evolution of institutions for collective action*. New York, Cambridge University Press : pp. 280.
- Ostrom, E. (1992). *Crafting institutions of self-governing irrigation systems*. San Francisco, Institute for Contemporary Studies : pp. 111.
- Ostrom, E., R. Gardner et J. Walker (1994). *Rules, Games and Common-pool resources*, University of Michigan Press
- Pagiola, S. (1993). Soil conservation and the sustainability of agricultural production. Doctor of Philosophy. Stanford, Food Research Institute, Stanford University : pp. 199.
- Paris, Q. et K. K. Knapp (1989). Estimation of the von-Liebig response functions. *American Journal of Agricultural Economics* **71**(1) : 178-186.
- Patten, L. H., J. B. Hardaker et D. J. Pannell (1988). Utility efficient programming for whole-farm planning. *Australian Journal of Agricultural Economics* **32**(2-3) : 88-97.
- Perry, C. J. (2001). Charging for irrigation water : the issues and options, with a case study from Iran. Research Report, 52. Colombo, Sri Lanka, International Water Management Institute.
- Perry, C. J., M. Rock et D. Seckler (1997). Water as an economic good : A solution, or a problem ? Research Report, 14. Colombo, Sri Lanka, International Irrigation Management Institute.
- Piet, L. (2002). Spatialisation d'un modèle d'équilibre général calculable pour l'étude de la localisation des activités agricoles à une échelle infra-nationale. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Environnement. Bordeaux, Unité de Recherche Agriculture et dynamique de l'espace rural, Eaux et Forêt, ENGREF : pp. 315.
- Porter, R. B. (1974). Semivariance and stochastic dominance : a comparison. *American Economic Review* **64** : 200-204.
- Pratt, J. W. (1964). Risk aversion in the small and in the large. *Econometrica* **32**(1-2) : 122-136.
- Provencher, B. et O. Burt (1993). The externalities associated with the common property exploitation of groundwater. *Journal of Environmental Economics and Management* **24**(2) : 139-158.
- Quiggin, J. (1982). A theory of anticipated utility. *Journal of Economic Behavior and Organisation* **3**(4) : 323-343.
- Rae, A. N. (1971). An empirical application and evaluation of discrete stochastic programming. *American Journal of Agricultural Economics* **53** : 625-638.
- Rhodes, G. F. et R. K. Sampath (1988). Efficiency, equity and cost recovery implications of water pricing and allocation schemes in developing countries. *Canadian Journal of Agricultural Economics* **36**(1) : 103-107.

- Rieu, T. et G. Gleyses (1993). Evaluation socio-économique d'un projet d'irrigation et étude prospective de la demande en eau. *La Houille Blanche*(2-3) : 119-125.
- Roemer, J. E. (1989). A public ownership resolution of the tragedy of the commons. *Social Philosophy and Policy* **6**(2) : 74-92.
- Rosegrant, M. W., X. Cai et S. A. Cline (2002). Global water and food : Prospects to 2025. Washington, DC, International Food Policy Research Institute.
- Roy, A. D. (1952). Safety first and the holding of assets. *Econometrica* **20** : 431-449.
- Rubio, S. J. et B. Casino (2003). Strategic behavior and efficiency in the common property extraction of groundwater. *Environmental and Resource Economics* **26**(1) : 73-87.
- Ruf, T. (2002). L'irrigation abordée sous l'angle de la gestion communautaire de bien communs : cadre conceptuel et méthodes d'approche des conflits entre parties prenantes. In : P. Garin, P. Y. L. Gal and T. Ruf (Eds). *La gestion des périmètres irrigués collectifs à l'aube du XXIème siècle : enjeux, problèmes, démarches. Actes de l'atelier du PCSI, 22-23 Janvier 2001, Montpellier ; France*. Montpellier, CI-RAD : 85-107.
- Rutherford, T. (2002). Mixed Complementarity Programming : Applications in Economics. Applied Math Colloquium. Boulder, Colorado University, Economics Department.
- Rutherford, T. F. (1997). MILES : a mixed inequality and non-linear equation solver, University of Colorado.
- Sampath, R. K. (1992). Issues in irrigation pricing in developing countries. *World Development* **20**(7) : 967-977.
- Sanchez, M. R. (1998). La politica nacional de las aguas subterraneas, Colegio de Michoacan y CEH.
- SAS Institute (2003). *SAS/STAT, Version 8.2*. Cary, NC, USA, SAS Institute
- Sebillotte, M. et L.-G. Soler (1998). Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*(74) : 59-70.
- Seckler, D. (1996). The new era of water resources management : from dry to wet water savings. Research Report, 1. Colombo, Sri Lanka, International Irrigation Management Institute.
- Semaan, J. (2001). A bio-economic model for policy analysis under water scarcity and nitrate pollution. Case study : an irrigated region of southern Italy. Master of Science. Montpellier,, CIHEAM : pp. 80 p. + annexs.
- Shah, T. (1993). *Groundwater Market and Irrigation Development : Political Economy and Practical Policy*. Bombay, Oxford University Press
- Shah, T., D. Molden, R. Sakthivadivel et D. Seckler (2000). The global groundwater situation : overview of opportunities and challenges. Colombo, Sri Lanka, IWMI.

- Shalit, H. (1995). Mean-Gini analysis of stochastic externalities : the case of ground-water contamination. *Environmental and Resource Economics* **6**(1) : 37-52.
- Stockle, C. O., S. A. Martin et G. S. Campbell (1994). CropSyst, a cropping systems simulation model : water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems* **46**(3) : 335-359.
- Strosser, P. (1997). Analyzing alternative policy instruments for the irrigation sector. An assessment of the potential for water market development in the Chishtian sub-division, Pakistan. Ph. D. Thesis,, Wageningen Agricultural University, The Netherlands : pp. 243.
- Tauer, L. W. (1983). Target MOTAD. *American Journal of Agricultural Economics* **65**(3) : 606-610.
- Taylor, J. E. et I. Adelman (1996). *Village economies*. Cambridge, Cambridge University Press : pp. 264.
- Telser, L. (1955). Safety first and hedging. *Review of Economic Studies* **23**(1) : 1-16.
- Theocharis, R. (1960). On the stability of the Cournot solution of the oligopoly problem. *Review of Economic Studies* **73** : 133-134.
- Tiercelin, J.-R., Ed. (1998). *Traité d'irrigation*. Paris, Lavoisier.
- Tsur, Y. (2000). Water regulation via pricing. In : A. Dinar (Ed.). *The political economy of water pricing reforms*. Oxford, Oxford University Press : 105-120.
- Tsur, Y. et A. Dinar (1997). The relative efficiency and implementation costs of alternative methods for pricing irrigation water. *World Bank Economic Review* **11**(2) : 243-262.
- Varela-Ortega, C., J. M. Sumpsi, A. Garrido, M. Blanco et E. Iglesias (1998). Water pricing policies, public decision making and farmers' response : implications for water policy. *Agricultural Economics* **19**(1-2) : 193-202.
- Vaux, H. J. J. et W. O. Pruitt (1983). Crop-water production functions. In : D. Hillel (Ed.). *Advances in irrigation*. New York, Academic Press.
- Ventosa, M., A. García-Alcalde, A. Mencía, M. Rivier et A. Ramos (2000a). Modeling Inflow Uncertainty in Electricity Markets : A Stochastic MCP Approach. In. 6th PMAAPS Conference, Madeira.
- Ventosa, M., M. Rivier, A. Ramos et A. García-Alcalde (2000b). An MCP approach for hydrothermal coordination in deregulated power markets. In. IEEE PES Summer Meeting.
- Vicien, C. (1991). Les modèles de simulation comme fonctions de production. *Economie Rurale*(204) : 46-50.
- Volle, M. (1997). *Analyse des données*. 4ème Edition. Paris, Economica
- von Neumann, J. et O. Morgenstern (1944). *Theory of games and economic behavior*. Princeton (USA), Princeton University Press

Références bibliographiques

- Wakker, P. (1994). Separating marginal utility and probabilistic risk aversion. *Theory and Decision* **36** : 1-44.
- Walker, W. R. (1989). *Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems*. Rome, FAO
- Weber, J. (1992). Environnement, Développement et Propriété ; une approche épistémologique. In : J. Prades and G. Vaillancourt (Eds). *Environnement, Développement, Ethique*. Montréal, Fides.
- Weber, J. (1995). Gestion des ressources renouvelables : fondements théoriques, Interne. Montpellier, CIRAD.
- Yitzhaki, S. (1982). Stochastic dominance, mean variance, and Gini's mean difference. *American Economic Review* **72**(1) : 178-185.
- Yoder, R. (1994). Locally managed irrigation systems : essential tasks and implications for assistance, management transfer and turnover programs. Colombo, IIMI.
- Zarnikau, J. (1994). Spot market pricing of water resources and efficient means of rationing water during scarcity (water pricing). *Resource and Energy Economics* **16**(3) : 189-210.

Annexes

Annexe A

Analyse multi-variée des données recueillies sur les puits collectifs

A.1 Méthode d'analyse

La méthode d'analyse des enquêtes réalisées sur les puits collectifs repose sur deux techniques de statistique multivariée.

L'analyse des correspondances multiples nous a permis d'analyser les relations entre divers caractères de la population. Elle est particulièrement adaptée au traitement des enquêtes car elle permet d'intégrer dans une même analyse des données quantitatives pures et des données qualitatives. Pour ce faire l'ensemble des données sont mises en classes (Tableau A.1), et ce sont les correspondances des modalités des variables recodées qui sont analysées, après la constitution d'un tableau disjonctif complet.

Ensuite, l'utilisation des techniques de classification, nous a permis de ranger les puits enquêtés en grandes classes de caractéristiques structurelles et de fonctionnement. Les résultats de la classification sont une aide supplémentaire à l'interprétation et à la classification des puits de la région.

A.2 Les variables retenues

Onze variables quantitatives principales ont été retenues. L'analyse factorielle des correspondances permet l'analyse de variables quantitatives, et de variables qualitatives. Pour ce faire, les variables quantitatives continues sont codées en grandes classes.

Variable	Description	Bornes		
		1	2	3
soc	No de membres	5	10	15
st	Superficie théorique	35,5	41	51,5
Si	Sup. irriguée durant le cycle OI 2002/2003	24	33	41
ctet	Tour d'eau théorique (sup. théorique)	30	35	45
cter	Tour d'eau théorique (sup. réelle)	22	29	37
cgini	Coefficient de gini	0,2	0,3	
cpch	Pourcentage de cultures horticoles	5	15	
cpcf	Pourcentage de cultures fourragères	4	14	
cpcer	Pourcentage de cultures céréalières	75	85	95
afo	Débit du puits (l/s)	29	33	
cvalor	Valorisation de l'eau (P/l/s)	2990	3780	4792

TAB. A.1 – Les variables et leur codification

Le tableau A.1 reprend les différentes variables définies dans le texte principal et les bornes qui ont servi à leur codification en variables discrètes. A ces variables quantitatives s'ajoutent les variables qualitatives déjà mises en classe : règles de répartition de l'eau et de répartition des coûts.

A.3 L'analyse des correspondances multiple

Principes de base

L'analyse factorielle des correspondances (AFC) est une méthode statistique qui permet de décrire de manière synthétique une table de contingence dans laquelle sont classés des individus homogènes suivant deux critères (ou variables catégorielles, les variables continues étant recodées en classes).

Alors que l'AFC étudie la relation entre deux caractères observés sur une population donnée, l'analyse des correspondances multiples (ACM) étudie les relations entre un nombre quelconque de caractères de cette population. L'ACM est donc une extension de l'AFC appliquée non plus à un tableau de contingence mais à un tableau disjonctif complet.

Résultats

Nous appliquons la méthode d'interprétation des AFC décrite dans l'ouvrage de Volle (1997).

Histogramme des inerties des axes

Le tableau A.2 présente les valeurs propres et les inerties expliquées par chacun des axes. Les trois premiers axes principaux expliquent plus de 50% de la variabilité reconnue. Le premier axe prenant presque 20% de l'inertie. Sans constituer des résultats exceptionnels, ces chiffres sont de l'ordre de grandeur couramment rencontrée dans les ACM. On focalisera donc le reste de l'étude sur les trois premiers axes.

Valeur propre	Inertie	Chi2	%	% cumulé	Barre
0,30	0,09	473,45	19,83	19,83	*****
0,29	0,08	438,16	18,35	38,19	*****
0,24	0,06	318,81	13,36	51,54	*****
0,21	0,05	243,74	10,21	61,75	*****
0,20	0,04	206,68	8,66	70,41	*****
0,18	0,03	167,23	7,01	77,42	*****
0,15	0,02	117,69	4,93	82,35	*****
0,14	0,02	106,70	4,47	86,82	*****
0,11	0,01	66,89	2,80	89,62	****
0,09	0,01	48,02	2,01	91,63	***
0,09	0,01	44,29	1,86	93,49	**
0,09	0,01	38,67	1,62	95,11	**

TAB. A.2 – Valeurs propres et leurs inerties

Les axes principaux et leurs interprétations

L'axe 1 (Tableau A.3) oppose des puits à débits importants (afo3), et à la composition hétérogène (cgini3) aux puits au débit plus faibles (afo1) et/ou une plus forte hétérogénéité entre les participants existe (cgini1). De même les superficies réellement irriguées (si) sont opposées. L'axe 1 peut donc être interprété comme l'axe « structure des puits ».

L'axe 2 (cf. tableau A.4) intègre de manière explicite les critères de pression sur l'eau (ctet et cter), opposant les puits où existe une forte pression théorique sur l'eau (cter4 et ctet4) à ceux où elle est beaucoup moins forte (ctet2). L'axe 2 peut donc être interprété comme un axe de « pression sur l'eau ».

L'axe 3 (Tableau A.5) semble plus difficile d'interprétation car il reprend les variables de surface. Cependant, on notera qu'il oppose les puits ayant une valorisation faible de l'eau (si1, cter1, cvalor1), notamment les puits où la culture d'hiver a été quasiment abandonnée, à ceux les superficies ont été

Variables	Contribution à l'axe 1	Contribution cumulée	Coordonnées sur l'axe 1	\cos^2
afo3	0,0927	9,3%	0,5302	0,6428
cgini3	0,0773	7,7%	0,6174	0,5821
si2	0,0582	5,8%	-0,4791	0,4213
si3	0,0531	5,3%	0,5117	0,3689
Cpcf3	0,0522	5,2%	0,5857	0,3758
Cter3	0,0516	5,2%	-0,4754	0,4283
afo1	0,0490	4,9%	-0,4014	0,4217
st1	0,0424	4,2%	-0,4092	0,2985
cgini1	0,0411	4,1%	-0,3288	0,4468

TAB. A.3 – Les principales contributions à l'axe 1

Variables	Contribution à l'axe 2	Contribution cumulée	Coordonnées sur l'axe 2	\cos^2
Cter4	0,1220	12,2%	0,7034	0,7339
si4	0,1053	22,7%	0,6201	0,6732
Ctet4	0,0778	30,5%	0,5617	0,4820
st1	0,0759	38,1%	-0,5263	0,4937
Regl3	0,0635	44,4%	0,5755	0,4998
Ctet2	0,0556	50,0%	-0,4504	0,4101
si2	0,0507	55,1%	-0,4304	0,3399
st3	0,0455	59,6%	0,4298	0,3549
Cvalor2	0,0451	64,1%	-0,4279	0,3299

TAB. A.4 – Les principales contributions à l'axe 2

Variables	Contribution à l'axe 3	Contribution cumulée	Coordonnées sur l'axe 3	\cos^2
si1	0,166	16,6%	-0,7004	0,7915
Cter1	0,132	29,9%	-0,6638	0,6443
Cvalor1	0,066	36,6%	-0,4437	0,3378
cpcer3	0,064	43,0%	0,4349	0,3764
cpcer4	0,041	47,1%	-0,2920	0,2533
si3	0,040	51,1%	0,36460	0,1872
st2	0,036	54,8%	-0,2987	0,2685
cpch2	0,032	58,1%	0,3798	0,1877
afo3	0,031	61,3%	0,2546	0,1482

TAB. A.5 – Les principales contributions à l'axe 3

préservées et où une diversification vers des cultures horticoles a pu être réalisée.

La représentation graphique des variables selon les trois premiers axes principaux est donnée dans les figures A.1, A.2 et A.3.

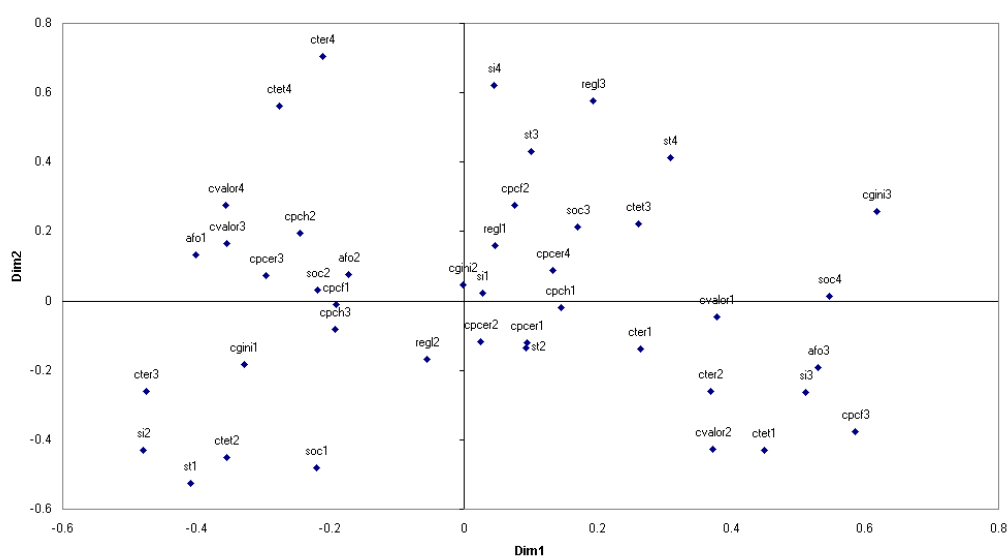


FIG. A.1 – Représentation graphique des modalités des variables selon les axes 1 et 2

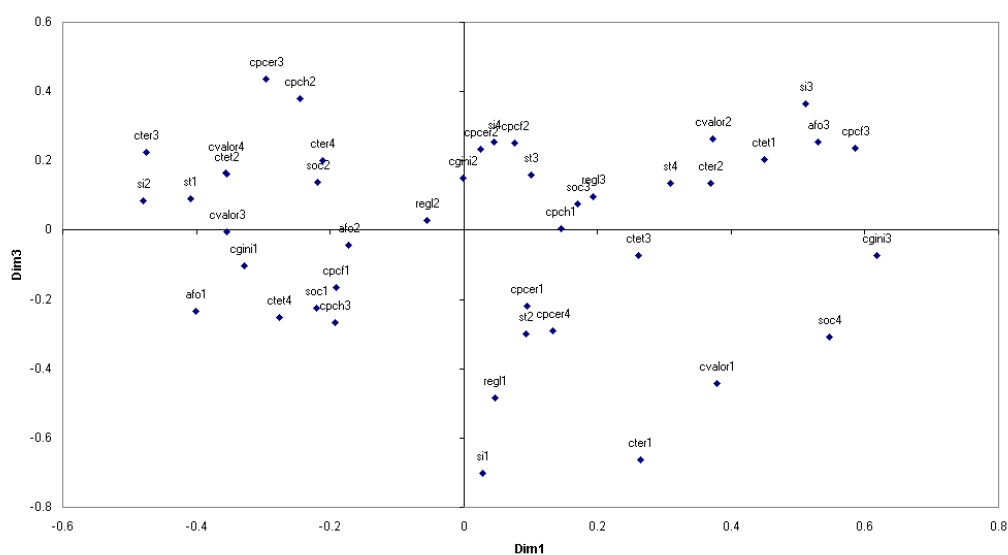


FIG. A.2 – Représentation graphique des modalités des variables selon les axes 1 et 3

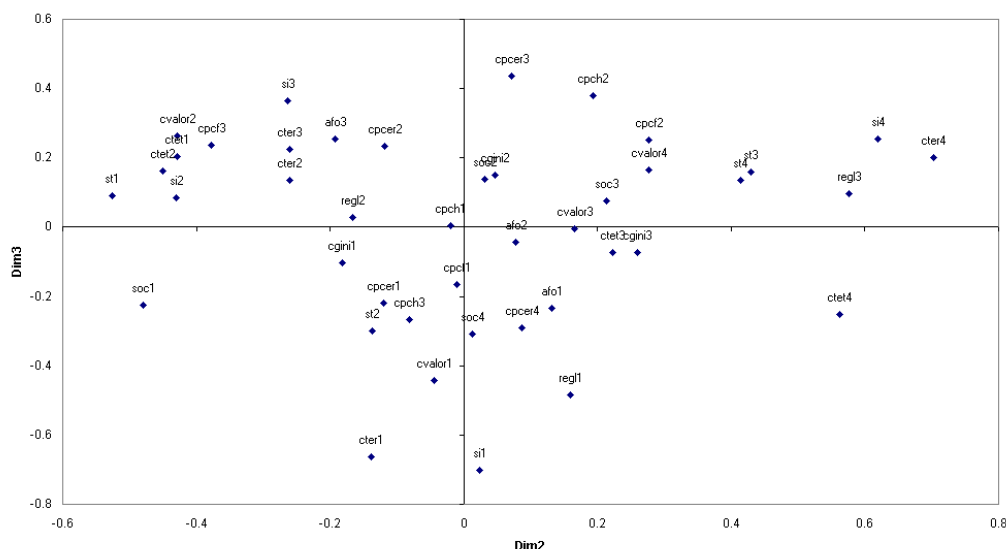


FIG. A.3 – Représentation graphique des modalités des variables selon les axes 2 et 3

A.4 La classification

Principe de base

L'objectif des classifications automatiques est de regrouper un certain nombre n d'observations en un certain nombre k de groupes, de façon à ce que les groupes obtenus soient constitués d'observations les plus semblables possibles et que les groupes soient les plus différents possibles entre eux. La diversité des méthodes en classification automatique est très importante. Trois éléments permettent de caractériser les méthodes de classification :

- L'algorithme de classification : la classification procède séquentiellement en regroupant les observations les plus semblables en premier lieu (méthodes hiérarchiques) ou elle regroupe en k groupes toutes les observations simultanément (méthodes non-hiérarchiques) ;
- Le critère de ressemblance entre deux observations ;
- Le critère de ressemblance entre deux groupes.

Pour notre analyse, nous avons utilisé une méthode hiérarchique au moyen de la procédure CLUSTER du logiciel SAS/STAT (SAS Institute, 2003).

L'algorithme de base est le suivant :

- A-t-on plus d'un groupe (si non, on termine).
- Calcul des ressemblances entre toutes les paires de groupes ;
- Fusion des deux groupes montrant la plus grande ressemblance (similarité) ou la plus faible dissemblance.

Les méthodes hiérarchiques différeront entre elles par le choix du critère de ressemblance et par la façon de mesurer les ressemblances entre un nouveau groupe fusionné et les autres inchangés. Nous avons choisi la méthode intermédiaire, « average linkage ».

Résultats : les principaux groupes et leurs interprétations

La classification hiérarchique nous donne cinq grands groupes de puits dont les statistiques sont présentées dans les tableaux A.6, A.7 et A.8. Nous en apportons ici une première interprétation.

Les groupes où la pression théorique sur l'eau d'irrigation est forte et où la pression réelle est faible du fait de l'abandon volontaire des cultures d'hiver par une grande partie des producteurs (groupe 5). Ces abandons ne sont pas toujours uniformes : certains producteurs abandonnent certaines de leurs parcelles mais pas toutes, certains producteurs abandonnent, d'autres pas. Il s'agit alors d'un abandon de fait des terres les moins productives au sein du puits. Il s'agit, en général de puits au débit faible (résultat de l'abaissement des nappes). L'allocation des coûts d'extraction y est proportionnelle aux superficies emblavées, mais les coûts de maintenance restent proportionnels aux superficies possédées par chacun des membres. Il en résulte un abaissement des coûts fixes pour ceux qui sèment en hiver.

Les groupes où la pression théorique est forte et où la pression réelle est faible du fait de l'établissement de limites dans l'utilisation de l'eau (groupe 3). Les faibles surfaces semées en hiver sont parfois compensées par des superficies en fourrages ou en cultures maraîchères. Puits à forts débits, mais nombre important de socios -> rapidement une règle de limitation. N'empêche pas la présence de fourrage, même si les céréales sont quand même la production la plus importante.

Les groupes où la pression théorique est faible et la pression réelle est donc faible, car un bon dimensionnement entre débit du puits et superficie irriguée par le puits (débits forts, et également présence d'eau de barrage qui vient en complément) ; Dans ces puits on ne constate que peu de cultures horticoles, mais on trouve des parts importantes de fourrages dans 50

Les petits groupes où la pression théorique est normale et la pression réelle est donc normale (groupe 2). La taille des groupes est plus faible que la moyenne (entre 4 et 10 membres). Ce sont aussi les groupes les plus homogènes. La petite taille et la relative homogénéité permettent sans besoin l'instauration de règles formelles particulières, la présence de cultures fourragères et de cultures horticoles, bien que l'on en trouve pas dans tous les groupes.

Groupe	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	P25	P50	P75
NSOC : Nombre de membres au sein du groupe							
1	10	3.96	5	15	6	11	13
2	7.36	2.8	4	12	4	8	10
3	23.67	3.21	20	26	20	25	26
4	10.78	2.91	7	15	9	10	14
5	14	8.68	5	30	8	12	21
STHE : Superficie irriguée théorique							
1	41.14	8.76	26	51	35	40	48
2	34.09	9.08	23	56	26	33	37
3	56.33	4.51	52	61	52	56	61
4	51.11	10.71	36	75	46	49	55
5	37.71	4.07	30	42	36	40	40
SIRRI : Superficie réellement irriguée durant le cycle OI 2002/2003							
1	38.69	7.13	26	49.75	35	40	40.73
2	31.99	8.67	23.5	56	26.83	30.5	33
3	30.5	15.4	13	42	13	36.5	42
4	44.22	13.8	22	75	42	43	46
5	15.8	7.6	1	24.63	14	15	21
TET : Tour d'eau théorique							
1	27.37	5.51	19.96	34.72	22.7	26.3	33.88
2	33.4	8.57	16.72	53.3	30.59	32.38	34.72
3	41.92	3.73	37.62	44.13	37.62	44.03	44.13
4	52	11.79	41.67	70.89	43.4	46.3	64.81
5	50.43	18.11	34.72	81.02	38.58	38.58	69.44

TAB. A.6 – Statistiques des groupes identifiés à l'aide de la classification

Groupe	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	P25	P50	P75
TER : Tour d'eau réel							
1	25.66	3.51	19.96	28.94	22.15	26.3	28.74
2	30.93	5.39	18.97	40.86	28.94	31.68	34
3	22.94	12.18	9.4	33.02	9.4	26.4	33.02
4	43.42	6.85	31.83	54.25	40.51	41.61	44.37
5	18.83	8.35	1.93	28.94	17.36	20.25	23.76
gini : Coefficient de gini							
1	0.28	0.05	0.23	0.37	0.24	0.28	0.31
2	0.15	0.08	0	0.25	0.12	0.15	0.23
3	0.34	0.07	0.3	0.42	0.3	0.31	0.42
4	0.22	0.12	0	0.33	0.17	0.28	0.29
5	0.23	0.16	0	0.43	0.09	0.19	0.39
PCH : Pourcentage des cultures horticoles							
1	0.36	0.94	0	2.5	0	0	0
2	11.31	10.76	0	33.33	0	11.94	16.95
3	7.41	7.71	0	15.38	0	6.85	15.38
4	8.51	14.46	0	44.44	0	0	11.13
5	8.84	15.17	0	33.33	0	0	28.57
PCF : Pourcentages des cultures fourragères							
1	24.1	35.32	0	100	0	14.29	30.5
2	9	21.56	0	73.06	0	1.64	9.09
3	12.93	9.32	4.76	23.08	4.76	10.96	23.08
4	4.7	5.24	0	11.27	0	2.38	10.87
5	0.97	1.84	0	4.76	0	0	2.03

TAB. A.7 – Statistiques des groupes identifiés à l'aide de la classification (2)

Groupe	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	P25	P50	P75
PCER : Pourcentage des cultures céréalières							
1	75.54	35.05	0	100	69.5	85.71	97.5
2	79.69	19.21	26.94	97.87	80.36	83.23	90.63
3	79.66	16.99	61.54	95.24	61.54	82.19	95.24
4	86.79	17.56	44.44	100	85.71	90.91	100
5	90.19	14.61	66.67	100	71.43	97.97	100
AF : Débit du puits							
1	44.71	12.49	30	65	35	41	58
2	31.15	10.88	19	55	20	30	35
3	38.93	1.85	36.8	40	36.8	40	40
4	29.44	8.55	20	50	25	30	30
5	23.57	6.9	15	30	15	25	30
Valor : Valorisation de l'eau de puits							
1	3076.6	368.3	2603.8	3551.2	2666.7	3000	3448.3
2	4778.1	1289.3	3300	7000	3575	4615.4	5454.5
3	2981.7	1091.1	1725	3687.5	1725	3532.6	3687.5
4	6261.8	3535.9	4161.3	15417	4500	4933.3	6266.7
5	2590	1421.4	200	4400	2000	2496.3	4200

TAB. A.8 – Statistiques des groupes identifiés à l'aide de la classification (3)

Les groupes où la pression théorique est forte, et la pression réelle reste forte (groupe 4). Toutes les surfaces sont mises en valeur en hiver, comme en été. Du fait de la forte pression, on constate une faible présence de cultures horticoles, ou de cultures fourragères. Dans les puits, où l'on retrouve ces cultures, on constate un changement des règles de répartition des coûts d'extraction. C'est dans ce groupe que l'on constate la plus forte valorisation des coûts d'extraction.

Annexe B

Analyse multi-variée des données recueillies sur les systèmes de production

Nous utiliserons ici la même méthodologie de classification que pour les puits. Nous n'en relatons donc pas les détails ici.

B.1 Les données

Vingt-deux variables ont été retenues pour mener à bien l'analyse. Les variables quantitatives continues sont codées en grandes classes (Tableau [B.1](#)).

Ces variables se rangent en quatre grandes catégories :

- Les données de superficie de l'exploitation ; On distingue la superficie en propriété dans les différentes catégories d'accès à l'eau, des superficies développées (superficie x no. de cycle) ;
- Les grandes orientations productives, avec en particulier les pourcentages des grands types de production : grains fins, gros grains, cultures horticoles, cultures fourragères. A noter que la présence de cultures fourragères n'implique pas forcément la présence d'animaux, et réciproquement car un marché des fourrages existe dans la région.
- Les données sur la production animale (essentiellement au travers des effectifs bovins et porcins) ;
- La structure de revenu des unités de production. En effet, on demandait au producteur de donner un rang (0 : nul, 1 : peu important, 2 : important, 3 : très important) pour les grandes classes d'activités (agricoles, des productions animales, extra-agricoles), ainsi que pour les revenus de la migration ;

Variable brute	Variable codée	Description	Bornes		
			1	2	3
sp	Spro	Sup. en propriété (ha)	3,6	5,5	8
sd	Sdev	Sup. développée (ha)	7,20	11	18
s_oi	Soi	Sup. cultivée (hiver)	3	5	7,90
s_ba	Sba	Sup. eau de barrage	0	0	0
s_pc	Spc	Sup. puits collectif	4	6,5	10,7
s_plu	Splu	Sup. pluvial (ha)	0	0	0,5
pgg	Gg	% gros grains	35,71	50	57,81
pgf	Gf	% grains fins	8,33	31,25	42,8
phor	Hor	% cult. horticoles	0	0	12,5
pfor	For	% cult. fourragères	0	0	0
UGB	Bov	No. Bovins (UGB)	0	1,5	5
Cerdo	Cerd	No. Porcs	0	0	1
nb_adult_casa	Adul	Adultes vivant maison	3	4	6
nb_adult_otrab	Otrab	Adultes travaillant extérieur	0	1	2
imp_agric	Ragri	Imp. revenu agricole (1-4)	0	1	2
imp_migracion	Rmig	Imp. revenus migration (1-4)	0	1	2
imp_noagric	Rnag	Imp. revenus non-agricoles (1-4)	0	1	2
imp_ganaderia	Rgan	Imp. revenus p. animales (1-4)	0	1	2
tract	Tra	No. tracteurs	0	0,1	1
semb_gg	sembm	No. semoirs gros grains	0	0,01	0,167
semb_gf	sembt	No. semoirs grains fins	0	0	0,1
dern_acha	Acha	Année dernier achat matériel	1950	1985	1992

TAB. B.1 – Les variables et leur codification

- La structure du capital, au travers des équipements de base (tracteurs et semoirs). A noter que les nombre non entiers de tracteurs correspondent au nombre de tracteur divisé par le nombre de sociétaire du groupe gérant ces tracteurs.

B.2 L'analyse des correspondances multiples

Histogramme des inerties des axes

Le tableau B.2 présente les valeurs propres et les inerties expliquées par chacun des axes. Les trois premiers axes principaux expliquent près de 56% de la variabilité. Le premier axe prenant à lui seul, plus de 30% de l'inertie. Sans constituer des résultats exceptionnels, ces chiffres sont de l'ordre de grandeur couramment rencontrée dans les ACM. On focalisera donc le reste de l'étude sur les trois premiers axes.

Valeur propre	Inertie	Chi2	%	% cumul	Histogramme
0,281	0,079	2798,38	30,24	30,24	*****
0,207	0,043	1521,05	16,44	46,68	*****
0,155	0,024	857,02	9,26	55,94	*****
0,130	0,017	600,67	6,49	62,44	*****
0,117	0,014	486,37	5,26	67,69	****
0,106	0,011	401,45	4,34	72,03	****
0,104	0,011	384,66	4,16	76,19	***
0,099	0,010	348,32	3,76	79,95	***
0,088	0,008	275,56	2,98	82,93	**
0,081	0,007	234,22	2,53	85,46	**
0,072	0,005	183,20	1,98	87,44	**
0,062	0,004	136,29	1,47	88,92	*
0,062	0,004	134,44	1,45	90,37	*
0,057	0,003	116,41	1,26	91,63	*

TAB. B.2 – Valeurs propres de l'analyse des correspondances

Les axes principaux et leurs interprétations

L'axe 1

L'axe 1 (Tableau B.3) est un axe qui oppose essentiellement les producteurs possédant des petites surfaces (spro1, sdev1) aux producteurs possédant des grandes surfaces (sdev4, spro4, soi4).

Modalités	Contribution	Contribution cumulée	Coordonnées	Cos ²
sdev4	7,5%	7,5%	0,7777	0,7883
soi4	6,6%	14,0%	0,7071	0,7772
spc4	6,6%	20,6%	0,7070	0,8137
sembm4	5,7%	26,3%	0,6561	0,8373
spro4	5,5%	31,8%	0,6677	0,7432
sembt2	4,9%	36,7%	0,5340	0,7617
srt4	4,4%	41,1%	0,8746	0,6221
tra4	4,4%	45,4%	0,9393	0,5881
acha1	3,9%	49,4%	-0,4568	0,5943
tra1	3,9%	53,3%	-0,4568	0,5943
spro1	3,6%	57,0%	-0,5266	0,5698
sdev1	3,6%	60,6%	-0,5070	0,5614
sba2	3,6%	64,1%	0,6021	0,5879
spc1	3,5%	67,6%	-0,4739	0,5853
acha4	3,2%	70,8%	0,4932	0,5657
soi1	2,4%	73,2%	-0,3884	0,4088
sembm1	2,3%	75,5%	-0,2884	0,5191

TAB. B.3 – Les principales contributions à la construction de l'axe 1

Associé avec ces données de surfaces vient le capital en mécanisation qui oppose également les producteurs possédant du matériel seul (sembm4, tra4), ou en commun (sembt2), aux producteurs possédant pas de tracteurs. Rappelons que la culture attelée a quasi disparu de la région, le fait de ne pas posséder de tracteur suppose donc que les travaux de préparation du sol et de semis se font au travers de la location de matériel.

La location de matériel est une pratique courante dans la région et le marché est bien installé. Il suppose cependant pour les producteurs des contraintes pour les productions, par exemple des sorties financières plus importantes en début de cycle, dates des travaux moins bien contrôlées, etc. L'axe 1 peut donc être interprété essentiellement comme un axe de taille des exploitations et de leur accès à la mécanisation.

L'axe 2

On trouve également dans l'axe 2 (Tableau B.4) des données de surface (sdev3, sdev1), mais elles ne constituent pas les contributions essentielles à l'axe 2.

On remarquera que rentrent également des données de diversification des revenus par des activités non agricoles (otrab4 = beaucoup de personnes du

Modalité	Contribution	Contribution cumulée	Coordonnées	cos ²
sdev3	7,5%	7,5%	-0,5233	0,7109
soi3	6,7%	14,2%	-0,5454	0,6762
rnag3	4,9%	19,1%	0,3935	0,5419
otrab4	4,7%	23,8%	0,5078	0,4679
adul3	3,2%	27,0%	0,3769	0,4190
spro3	3,2%	30,2%	-0,3540	0,3887
rnag1	3,1%	33,3%	-0,2486	0,4616
gf4	3,1%	36,4%	-0,3462	0,3888
soi1	2,9%	39,3%	0,3203	0,2780
adul1	2,7%	42,0%	-0,2571	0,3918
sdev1	2,7%	44,7%	0,3225	0,2272
spro1	2,6%	47,3%	0,3266	0,2191
gg4	2,5%	49,8%	0,3243	0,2779
ragri2	2,4%	52,3%	0,3173	0,2942
acha2	2,3%	54,6%	-0,3423	0,2970
sdev4	2,3%	56,8%	0,3157	0,1299
spc1	2,2%	59,1%	0,2795	0,2037
gg2	2,2%	61,3%	-0,2457	0,3621
tra4	2,1%	63,4%	0,4845	0,1564

TAB. B.4 – Les principales contributions à la construction de l'axe 1

ménages ont des activités extra-agricoles, opposé à rnag1 : les revenus non-agricoles sont nuls). On constate enfin que les données démographiques des ménages contribuent également (adul3 contre adul1).

L'axe 2 oppose ainsi les ménages ayant peu de main d'œuvre familiale essentiellement occupée à l'agriculture, aux ménages où la main d'œuvre familiale est plus importante et travaille en partie à l'extérieur de l'agriculture, contribuant ainsi à diversifier les sources de revenu du ménage. Il peut donc être interprété comme l'axe des données démographiques du ménage et de l'occupation des membres du ménages.

L'axe 3

L'axe 3 (Tableau B.5), reprend également les données de diversification des sources de revenus au sein des ménages, notamment par la présence ou non de productions animales, ou horticoles.

Variable	Contribution	Contribution cumulée	Coordonnées	Cos2
tra2	8,0%	8,0%	0,4790	0,4537
rgan3	7,1%	15,1%	0,4910	0,4936
rnag2	6,4%	21,5%	0,4280	0,5321
bov4	4,9%	26,5%	0,3392	0,3330
otrab2	4,6%	31,1%	0,3018	0,3885
for2	3,6%	34,7%	0,2309	0,2865
gg1	3,5%	38,2%	0,2849	0,2381
sembm1	3,1%	41,3%	-0,1874	0,2192
sembm3	3,0%	44,2%	0,2553	0,2131
adul2	2,9%	47,1%	0,2771	0,2548
acha2	2,7%	49,8%	0,2788	0,1970
sdev3	2,4%	52,2%	-0,2218	0,1277
rgan1	2,3%	54,5%	-0,1543	0,2659
soi2	2,3%	56,8%	0,2245	0,1624
tra1	2,2%	59,0%	-0,1869	0,0995
acha1	2,2%	61,1%	-0,1869	0,0995
for1	2,1%	63,3%	-0,1374	0,2865

TAB. B.5 – Les principales contributions à la construction de l'axe 3

La représentation graphique des variables selon les trois premiers axes principaux est donnée dans les figures B.1 et B.2.

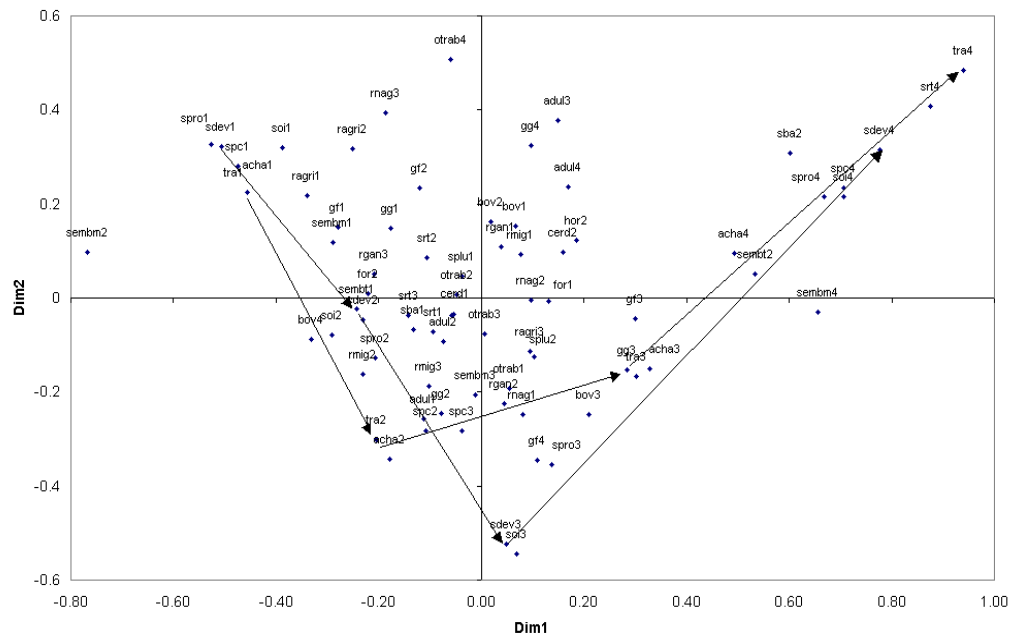


FIG. B.1 – Représentation graphique des modalités des variables selon les axes 1 et 2

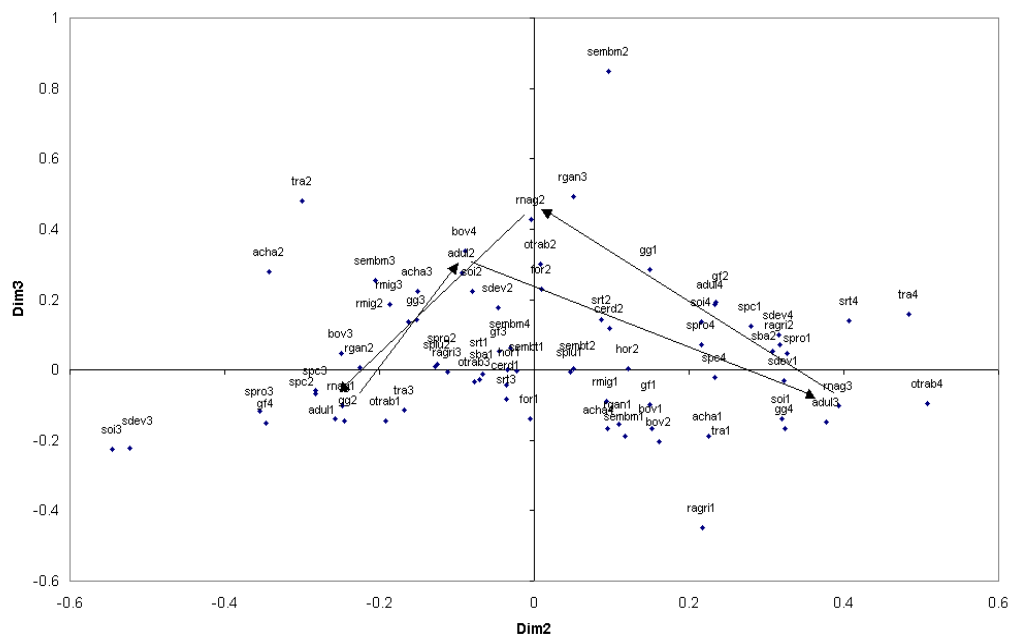


FIG. B.2 – Représentation graphique des modalités des variables selon les axes 2 et 3

B.3 La classification

Méthode

Pour cette analyse, nous avons utilisé une méthode hiérarchique au moyen de la procédure CLUSTER du logiciel SAS/STAT (SAS Institute, 2003).

Les méthodes hiérarchiques diffèrent entre elles par le choix du critère de ressemblance et par la façon de mesurer les ressemblances entre un nouveau groupe fusionné et les autres inchangés. Nous avons choisi la méthode inter-médiaire « *average linkage* ».

Résultats

L'historique de la formation des groupes (Tableau B.6) nous apporte une aide précieuse sur le nombre de groupes qu'il sera intéressant de prendre en considération. En effet, on observe deux pics du « *cubic clustering criterion* » autour de 4 puis de 8 groupes, ce qui nous suggère d'arrêter la répartition à l'une de ces deux agrégations (SAS Institute, 2003). L'observation du *pseudo-F* confirme cette analyse. Pour ne pas compliquer outre mesure l'analyse, nous avons donc distingué quatre grands groupes de producteurs.

A ce niveau de décomposition, l'indice R^2 , qui représente la proportion de l'inertie du nuage prise en compte par les groupes, est égal à 0,696. Avec 4 groupes, nous avons la proportion de la variance prise en compte est donc proche de 70%, ce qui apparaît comme un bon compromis.

No cluster	Nom	Effectifs	R^2	$E(R^2)$	Cubic clustering criterion	Pseudo-F
9	CL17	10	0.848	0.827	1.66	40.6
8	CL19	9	0.834	0.806	2.02	42.4
7	CL11	18	0.8	0.781	1.24	40
6	CL9	14	0.774	0.748	1.53	41.8
5	CL7	27	0.721	0.706	0.79	40.1
4	CL37	12	0.696	0.647	2.5	48
3	CL12	26	0.539	0.536	0.13	37.4
2	CL5	53	0.32	0.346	-0.79	30.6
1	CL2	67	0	0	0	.

TAB. B.6 – Historique de la formation des groupes

Le dendrogramme de la classification est présenté en figure B.3. La coupure de ce dendrogramme à quatre groupes montre la présence d'un groupe plus

représenté dans la population échantillonnée. Ce qui est confirmé par l'observation des effectifs (groupe 1, $n = 14$; groupe 2, $n = 27$; groupe 3, $n = 14$; groupe 4, $n = 12$).

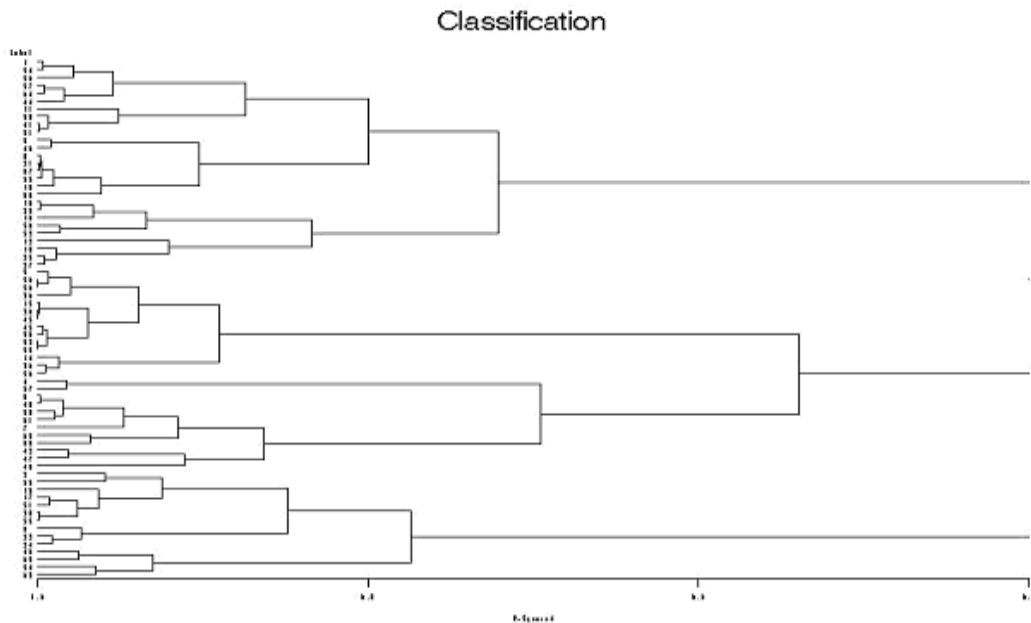


FIG. B.3 – Dendrogramme de la classification hiérarchique

La représentation des individus selon les trois premiers axes factoriels (Figures B.4 et B.5) montre une séparation relativement correcte des individus. Les groupes 2 et 4 qui apparaissent assez mal séparés dans le plan (axe 1, axe 2) sont en fait bien discriminés dans la représentation dans le plan (axe2, axe 3).

Enfin, les données finales sur les groupes sont présentées dans les tableaux récapitulatifs des groupes (Tableaux B.7, B.7 et B.9).

L'interprétation qualitative des groupes identifiés est réalisée directement dans le texte (cf. 3.6, page 98).

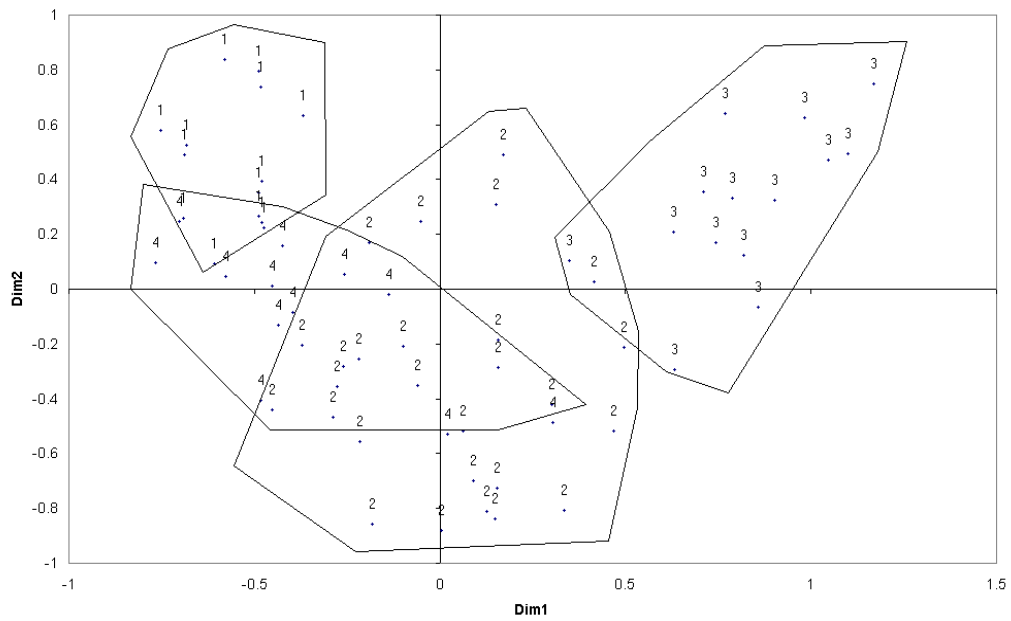


FIG. B.4 – Individus en classes représentés dans l'espace des deux premiers axes

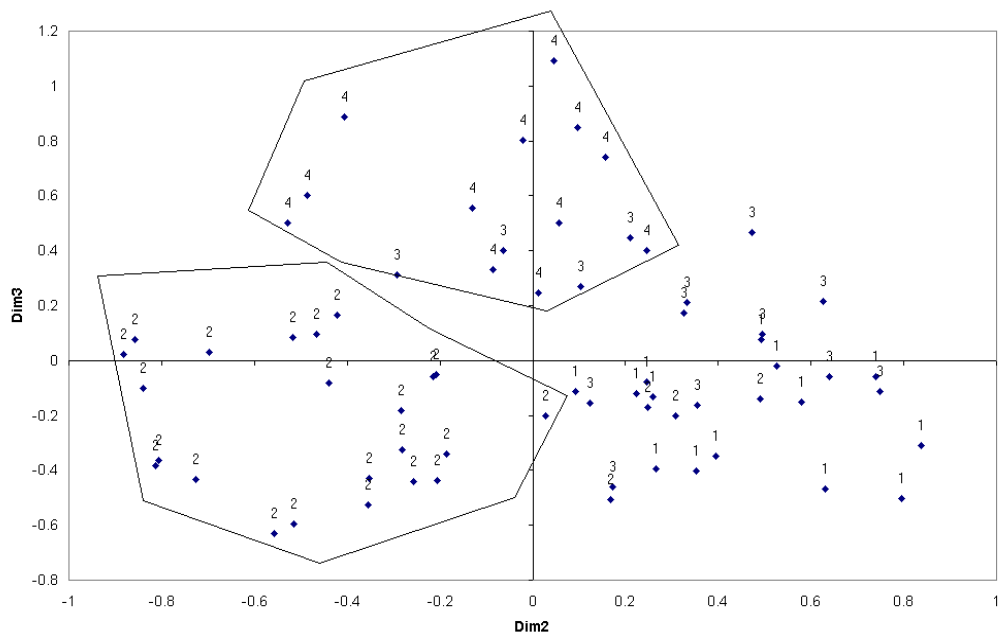


FIG. B.5 – Individus en classes représentés dans l'espace des axes 2 et 3

Variable	Groupe	Moyenne	Ecart-type	P25	P50	P75
Sprop	1	3.09	1.63	1.8	3.5	4
	2	6.05	2.5	4.4	6	7
	3	14.51	7.65	10	12.64	20
	4	4.52	1.86	3.3	4.08	5.35
SDEV	1	5.54	2.26	4	5.5	7.78
	2	12.45	4.21	10	12.5	16
	3	41.13	20.16	26	36.5	53.5
	4	8.95	2.31	7.18	8.65	10.5
Spd	1	4.95	2.21	3.6	5	7
	2	11.46	4.14	8.8	11	14
	3	29.13	13.66	21.36	25.5	39
	4	8.41	2.05	6.92	8.25	9.8
S Louée Dev	1	0.59	1.05	0	0	1
	2	1	1.85	0	0	2
	3	12	14.5	0	8.75	17
	4	0.54	0.99	0	0	1
SOI	1	1.96	1.18	1	1.9	3
	2	5.13	2.41	3.5	5.5	6.5
	3	19.58	12.59	11	13.5	28
	4	4.02	0.96	3.54	3.83	4.7
S_BA	1	0.14	0.53	0	0	0
	2	0.33	1.27	0	0	0
	3	8.14	11.03	0	2.5	12
	4	0.04	0.14	0	0	0
S_PC	1	3.29	1.65	2	3	4
	2	7.84	3.54	6	7	10
	3	26.63	18.79	15	21.5	34
	4	4.98	1.99	3.54	4.08	6.6
S_PLU	1	0.54	1.08	0	0	0.5
	2	0.74	2.69	0	0	0.5
	3	0.94	2.08	0	0	1
	4	0.82	1.57	0	0	0.9
pgg	1	50.43	23.89	37.5	53.57	65.12
	2	48.47	15.15	43.94	50	56
	3	46.39	21.62	26.15	54.61	58.6
	4	34.82	19.09	22.82	33.81	48.52

TAB. B.7 – Statistiques descriptives sur les variables quantitatives pour les groupes identifiés

Variable	Groupe	Moyenne	Ecart-type	P25	P50	P75
pgf	1	15.34	17.33	0	10.42	25
	2	35.28	18.82	29.41	40	47.06
	3	31.56	21.14	22.86	35.03	38.3
	4	22.46	14.88	8.04	27.6	31.53
phor	1	3.92	10.38	0	0	0
	2	5.06	16.05	0	0	0
	3	18	32.49	0	0	20
	4	5.44	12.1	0	0	2.27
pfor	1	21.31	34.47	0	0	28.57
	2	4.75	11.27	0	0	0
	3	4.46	10	0	0	4.55
	4	27.55	28.74	1.56	22.61	40.86
UGB	1	3.71	5.96	0	1.25	5
	2	2.65	3.73	0	1.5	3.67
	3	3.32	8.67	0	0.25	2
	4	6.63	5.65	1.33	6	11.92
CERDO	1	0.36	1.08	0	0	0
	2	0.48	1.16	0	0	0
	3	7.86	14.9	0	0	10
	4	4.08	7.93	0	0	4
nb_adult_casa	1	6.14	4.72	3	5.5	6
	2	3.33	2	2	3	4
	3	5.86	2.85	4	5.5	7
	4	4.75	1.82	4	4	5.5
nb_adult_otrab	1	3.14	4.59	1	2	4
	2	0.52	0.89	0	0	1
	3	1.14	1.35	0	1	2
	4	1.08	0.79	1	1	1
TRACT	1	0	0	0	0	0
	2	0.34	0.41	0.05	0.14	1
	3	1.43	1.14	0.38	1	2
	4	0.06	0.06	0	0.05	0.08

TAB. B.8 – Statistiques descriptives sur les variables quantitatives pour les groupes identifiés (suite)

Importance des revenus de la migration				
Groupe	rmig1	rmig2	rmig3	Total
1	10	2	2	14
2	18	4	5	27
3	12	0	2	14
4	4	2	6	12
Total	44	8	15	67
Importance des revenus de l'agriculture				
Groupe	ragri1	ragri2	ragri3	Total
1	1	6	7	14
2	1	3	23	27
3	0	2	12	14
4	0	5	7	12
Total	2	16	49	67
Importance des revenus des productions animales				
Groupe	rgan1	rgan2	rgan3	Total
1	9	4	1	14
2	16	10	1	27
3	8	4	2	14
4	3	2	7	12
Total	36	20	11	67
Importance des revenus non agricoles				
Groupe	rnag1	rnag2	rnag3	Total
1	2	1	11	14
2	21	1	5	27
3	7	4	3	14
4	3	7	2	12
Total	33	13	21	67

TAB. B.9 – Tableau des effectifs pour les variables d'importance relative des sources de revenus

Annexe C

Guide d'enquête pour les puits collectifs

Entrevista con la(s) persona(s) responsable(s) de pozo profundo (grupos)

1. Características del pozo

1.1. Profundidad actual de perforación: _____ m

1.2. Actualmente, cuantos tramos: ____ tramos x ____ m = _____ m

1.3. Tipo de bomba: ___submergible __ no submergible (de flecha)

1.4. Capacidad del motor: _____ (Caballos)

1.5. Medidor volumétrico de agua?

1.5.1. __ Sí, se utiliza;

Cuantos m³ gastan por año? _____ m³ __ No sé

1.5.2. __ Sí, pero no se utiliza

1.5.3. __ Sí, pero no funciona

1.5.4. __ No esta

1.6. Diámetro de descarga _____ (pulgadas)

1.7. Diámetro efectivo de descarga _____ (pulgadas)

1.8. Distancia de su pozo al pozo más cercano? _____ km

2. Grupo (estructura actual)

2.1. Cuantos socios: _____

2.2. Al inicio, cuantos socios tenia el grupo? _____
(si diferente, entender porque!)

2.3. La mayoría de los socios del pozo,
también manejan en grupo otras cosas, como tractores,
comercialización de productos... __ Sí __ No Cuales: _____

2.4. A veces, venden agua a personas fuera del grupo: __ Sí __ No
Precise (cuando, a quien, porque, frecuencia de las transacciones...):

Tarifas de la venta de agua: _____ \$/ha _____ \$/hora

2.5. Cuándo se ha dado la ultima venta de agua?
Ciclo _____ Año: _____ Quien? _____

2.6. Superficie maximal regada autorizada con este pozo: _____ (ha)

2.7. Cuantas personas rentan tierras regadas con este pozo
pero no son socios del grupo _____

2.7.1. Si rentan, corresponde a cual superficie rentada: _____ (ha)

2.7.2. Los que rentan esas tierras son parte del grupo (asociación)?
__ Sí __ No

3. Homogeneidad en cuanto al riego (punto de vista del encargado!)

3.1. A dentro del grupo, algunos socios tiran más agua que los demas?
__ Sí __ No Detalles: _____

3.2. Elementos tecnicos que podrían explicar que algunos socios
gastan mas/menos que los otros
a. Parcelas que son dificiles de acceso
b. Tierras que gastan mas agua que los demas (arenosas, etc.)
c. Pendientes bastante importantes
d. Tierras desniveladas
e. Otros

Detalles: _____

3.3. Elementos otros que técnicos que explican que estos socios
gastan más que otros.
a. falta de supervision durante el riego
b. abren demasiados surcos al mismo tiempo (u otros problemas tecnicos)

c. otro: _____

4. Reglas para compartir el agua

4.1. Entre los socios, existe un limite de superficie? __Si __No

a. Puedo regar toda la superficie que tengo?

a. Algunos socios rentan tierras de temporal?

b. No puedo regar mas que ___% de la superficie que tengo

c. No puedo regar mas que ___ ha

4.2. Cómo se comparte el agua del pozo entre los socios (tiempo) ?

a. Toma lo que necesita (sin reglas particulares)

b. Tiene un tiempo determinado (igual para cada socio) _____ horas/socio

c. Tiene un tiempo determinado (depiende de la superficie) _____ horas/ha

d. Otro: _____

5. Reglas para la distribución del agua

5.1. Como se organisa el turno de agua

a. Ordenado y fijo, año con año : _____

b. Ordenado y cambiando: _____

c. No ordenado (açuando quiero!)

d. Otra: _____

5.2. Durante el ciclo del trigo, a veces se para el pozo? __Sí __ No

5.2.1. Mas o menos, cuantos dias se para entre dos turnos de agua: _____ días

6. Reglas para compartir los costos de electricidad

6.1. Cómo se comparten los costos de electricidad del pozo?

-- Ha __ Hora __ Igual por cada socio __Otro: _____

Si se paga por ha o igual por cada socio...

6.2. Hay discusiones a dentro del grupo para cambiar las reglas?

-- Sí __ No

6.3. Cuál seria el nuevo tipo de reglas?

6.4. En que serviría establecer esas nuevas reglas?

6.5. Por qué no se ha dado el cambio todavía?

6.6. Factores tecnicos que rendiria el pago por horas injusto?
(ex. varios lineas de riego al mismo tiempo?)

Si se paga por horas...

6.7. Cuándo se dio el cambio? _____ (años)

6.8. Cómo y porque se dio el cambio de reglas?

6.9. Qué impacto tuvo este cambio de reglas sobre el manejo del agua?

6.10. Hay discusiones a dentro del grupo para cambiar las reglas?

6.11. Quién contabiliza las horas?

a. El representante

b. Otra persona? _____ Siempre la misma? _____

7. Otros actividades

7.1. Cómo se hace la repartición de los costos fijos (mantenimientos)?

a. Por ha

b. Otro: _____

7.2. Algunas otras actividades de mantenimiento para participar al grupo?

a. mantenimiento de canales

b. otros: _____

8. Evaluar los costos del m3

Tiempo inicial: _____

Tiempo final: _____

Consumo electrico Tiempo inicial : _____ kW

Tiempo final: _____ kW

Medidor vol. Tiempo inicial: _____ m3

Tiempo final: _____ m3

Si es posible, obtener las facturas de electricidad recientes
(ultimos seis meses) para comparar los gastos entre pozos...

9. Mapa del pozo (parcelas)

Annexe D

Modèle d'une tactique d'irrigation

Modèle LINGO couplant un modèle de raie et la décision de maximiser le rendement net d'irrigation pour une dose d'application recherchée donnée.

```
MODEL:
SETS:
points /1..21/: COOR, X, TAVANCE, TENT, TREC, TINF, DINF;
END SETS

Max = RN;

GB0 = largeurBas + ((largeurHaut - largeurBas) * hauteurEau0 / profondeur);
A00 = (largeurBas + GB0) * hauteurEau0 / 2;
PERIO = largeurBas + (2 * (((GB0 - largeurBas)/2)^2 + hauteurEau0^2)^0.5);
RH0 * PERIO = A00;
Qest0 = 1000 * A00 * rugosite * RH0^0.667 * pente^0.5;
Qest0 = 1 ;
GB = largeurBas + ((largeurHaut - largeurBas) * hauteurEau / profondeur);
A0 = (largeurBas + GB) * hauteurEau0 / 2;
PERI = largeurBas + (2 * (((GB - largeurBas)/2)^2 + hauteurEau^2)^0.5);
RH * PERI = A0;
Qest = 1000 * A0 * rugosite * RH^0.667 * pente^0.5;
(Qest - DebitS) * 100 = 0 ;

Cs * PERIO = Cs0 * PERI;
Lm * Cs = DebitS * 60;
Lm > long_parc;
alpha * ((0.8 * A0) + B) = Cs;
```

```

@FOR(points(p): COOR(p) = p -1;
X(p) = COOR(p) * (long_parc / 20) ; );
@FOR(points(p):
[AA] TAvance(p) * alpha = -@log(1-(X(p)/Lm)) ;
[AB] TENT(p) = duree - Tavance(p);
[AC] TREC(p) * ((60 * (Pente^0.5)*(Cs^0.667))^(3/5)) = X(p)^(3/5);
[AD] TINF(p) = TENT(p) + TREC(p) ;
[AE] DINF(p) = ((Cs * TINF(p)) + B) / dRaies;);

[BA] DB = DebitS * 60 * duree / (long_parc * dRaies);
[BB] (DI * 21) - @SUM(points: DINF) = 0;
[BC] DN * 5 - @SUM(points(p) | p #GT# 16 : DINF(p)) = 0;

DN2 = @SMIN(DN, doseVoulue);

[BD] RN * DB = DN2 * 100;
[BE] DebitS * NRAIES = DEBITPUIT;
[BF] DebitS - 0.05 > 0;
[BG] DebitS - 3 < 0;
[BH] HauteurEau < profondeur;
[BI] HauteurEau > 0.02;
[BJ] nraies < larg_parc / draies;
[BK] DN > doseVoulue;

DINF1 = DINF(1);
DINF2 = DINF(6);
DINF3 = DINF(11);
DINF4 = DINF(16);
DINF5 = DINF(21);
INIT:
hauteurEau0 = 0.03;
peri0 = 0.17;
hauteurEau = 0.05;
peri = 0.2;
Cs = 0.04;
Lm = 2300;
rh = 0.03;
rh0 = 0.02;
nraies = 20;
END INIT
DATA:
doseVoulue = @pointer(1) ;!80;

```

```
CS0 = @pointer(2) ;
B = @pointer(3);
DebitPuit = 20; ! 22;
long_parc = 200;
pente = 0.015;
dRaies = 1.5;
larg_parc = 100;
largeurBas = 0.088;
largeurHaut = 0.22;
Profondeur = 0.09;
rugosite = 25;

!renvoi des donnees;
@pointer(5) = RN;
@pointer(6) = DUREE;
@pointer(7) = DI;
@pointer(8) = DN;
@pointer(9) = DB;
@pointer(10) = nraies;
@pointer(11) = tirr;
@pointer(12) = ntend;
@pointer(13) = @STATUS();

END DATA

END
```

Annexe E

Modèle de pilotage des irrigations

Modèle de pilotage des irrigations pour les différentes tactiques d'irrigation.

MODEL:

```
!ChoixDT2.lng - Premiere tactique;  
!Maximisation du rendement net pour une dose voulue ;  
!La dose voulue est calculée de manière externe à partir du ;  
!bilan hydrique;
```

SETS:

```
points /1..21/: COOR, X, TAVANCE, TENT, TREC, TINF, DINF;  
END SETS
```

MAX = RN;

```
GB0 = largeurBas + ((largeurHaut - largeurBas) * hauteurEau0 / profondeur);  
A00 = (largeurBas + GB0) * hauteurEau0 / 2;  
PERI0 = largeurBas + (2 * (((GB0 - largeurBas)/2)^2 + hauteurEau0^2)^0.5);  
RH0 * PERI0 = A00;  
Qest0 = 1000 * A00 * rugosite * RH0^0.667 * pente^0.5;  
Qest0 = 1 ;
```

```
GB = largeurBas + ((largeurHaut - largeurBas) * hauteurEau / profondeur);  
A0 = (largeurBas + GB) * hauteurEau / 2;  
PERI = largeurBas + (2 * (((GB - largeurBas)/2)^2 + hauteurEau^2)^0.5);  
RH * PERI = A0;  
Qest = 1000 * A0 * rugosite * RH^0.667 * pente^0.5;
```

```

(Qest - DebitS) * 100 = 0 ;

Cs * PERIO = Cs0 * PERI;
Lm * Cs = DebitS * 60;
Lm > long_parc;
alpha * ((0.8 * A0) + B) = Cs;

@FOR(points(p): COOR(p) = p -1;
X(p) = COOR(p) * (long_parc / 20) ;
);
@FOR(points(p):
[AA] TAvance(p) * alpha = -@log(1-(X(p)/Lm)) ;
[AB] TENT(p) = duree - Tavance(p);
[AC] TREC(p) * ((60 * (Pente^0.5)*(Cs^0.667))^(3/5)) = X(p)^(3/5);
[AD] TINF(p) = TENT(p) + TREC(p) ;
[AE] DINF(p) = ((Cs * TINF(p)) + B) / dRaies;
);

[BA] DB = DebitS * 60 * duree / (long_parc * dRaies);
[BB] (DI * 21) - @SUM(points: DINF) = 0;
[BC] DN * 5 - @SUM(points(p) | p #GT# 16 : DINF(p)) = 0;

[BD] RN * DB = doseVoulue * 100;
[BE] DebitS * Nraies = DEBITPUIT;
[BF] DebitS - 0.05 > 0;
[BG] DebitS - 3 < 0;
[BH] HauteurEau < profondeur;
[BI] HauteurEau > 0.02;
[BJ] nraies < larg_parc / draies;

[BK] DN > doseVoulue;

DINF1 = DINF(1);
DINF2 = DINF(6);
DINF3 = DINF(11);
DINF4 = DINF(16);
DINF5 = DINF(21);

NTEND = (larg_parc / dRaies) / nraies ;
TIRR = (NTEND * DUREE * 10000) / (60 * larg_parc * long_parc);
TIRR < TIRR_MAX;
@free(ntend); @free(tirr);
@free(RN);

```

INIT:

```
hauteurEau0 = 0.03;  
peri0 = 0.17;  
hauteurEau = 0.05;  
peri = 0.2;  
Cs = 0.04;  
Lm = 2300;
```

END INIT

DATA:

```
DebitPuit = @pointer(1); ! 22;  
CS0 = @pointer(2) ;  
B = @pointer(3);  
long_parc = @pointer(4);  
pente = @pointer(5);  
dRaies = @pointer(6);  
larg_parc = @pointer(7);  
  
largeurBas = @pointer(8);  
largeurHaut = @pointer(9);  
Profondeur = @pointer(10);  
rugosite = @pointer(11);  
doseVoulue = @pointer(12) ;!80;  
nraieMin = @pointer(13);  
TIRR_MAX = @pointer(14);
```

```
!renvoi des donnees;  
@pointer(15) = DUREE;  
@pointer(16) = NRAIES;  
@pointer(17) = DINF1;  
@pointer(18) = DINF2;  
@pointer(19) = DINF3;  
@pointer(20) = DINF4;  
@pointer(21) = DINF5;  
@pointer(22) = RN;  
@pointer(23) = DI;  
@pointer(24) = DN;  
@pointer(25) = DB;  
@pointer(26) = TIRR;
```

```
@pointer(27) = @STATUS();
END DATA
END
```

```
MODEL:
!ChoixDT2.lng - Deuxieme tactique;
!Maximisation de la dose nette;
!Damien Jourdain - Nov 2002;
```

```
SETS:
points /1..21/: COOR, X, TAVANCE, TENT, TREC, TINF, DINF;
END SETS
```

```
MAX = DN;
```

```
GB0 = largeurBas + ((largeurHaut - largeurBas) * hauteurEau0 / profondeur);
A00 = (largeurBas + GB0) * hauteurEau0 / 2;
PERI0 = largeurBas + (2 * (((GB0 - largeurBas)/2)^2 + hauteurEau0^2)^0.5);
RH0 * PERI0 = A00;
Qest0 = 1000 * A00 * rugosite * RH0^0.667 * pente^0.5;
Qest0 = 1 ;
```

```
GB = largeurBas + ((largeurHaut - largeurBas) * hauteurEau / profondeur);
A0 = (largeurBas + GB) * hauteurEau0 / 2;
PERI = largeurBas + (2 * (((GB - largeurBas)/2)^2 + hauteurEau^2)^0.5);
RH * PERI = A0;
Qest = 1000 * A0 * rugosite * RH^0.667 * pente^0.5;
(Qest - DebitS) * 100 = 0 ;
```

```
Cs * PERI0 = Cs0 * PERI;
Lm * Cs = DebitS * 60;
Lm > long_parc;
alpha * ((0.8 * A0) + B) = Cs;
```

```
@FOR(points(p): COOR(p) = p -1;
X(p) = COOR(p) * (long_parc / 20) ;
);
@FOR(points(p):
[AA] TAvance(p) * alpha = -@log(1-(X(p)/Lm)) ;
[AB] TENT(p) = duree - Tavance(p);
[AC] TREC(p) * ((60 * (Pente^0.5)*(Cs^0.667))^(3/5)) = X(p)^(3/5);
[AD] TINF(p) = TENT(p) + TREC(p) ;
```



```

[AE] DINF(p) = ((Cs * TINF(p)) + B) / dRaies;
![AF] TENT(p) > 1;
);

[BA] DB = DebitS * 60 * duree / (long_parc * dRaies);
[BB] (DI * 21) - @SUM(points: DINF) = 0;
[BC] DN * 5 - @SUM(points(p) | p #GT# 16 : DINF(p)) = 0;


[BD] RN * DB = DN * 100;
[BE] DebitS * NRAIES = DEBITPUIT;
[BF] DebitS - 0.05 > 0;
[BG] DebitS - 3 < 0;
[BH] HauteurEau < profondeur;
[BI] HauteurEau > 0.02;
[BJ] nraies < larg_parc / draies;


DINF1 = DINF(1);
DINF2 = DINF(6);
DINF3 = DINF(11);
DINF4 = DINF(16);
DINF5 = DINF(21);


NTEND = (larg_parc / dRaies) / nraies ;
TIRR = (NTEND * DUREE * 10000) / (60 * larg_parc * long_parc);
TIRR = TIRR_MAX;
@free(ntend); @free(tirr);
@free(ntend);


INIT:
hauteurEau0 = 0.03;
peri0 = 0.17;
hauteurEau = 0.05;
peri = 0.2;
Cs = 0.04;
Lm = 2300;
nraies = 20;
END INIT


DATA:

DebitPuit = @pointer(1); ! 22;

```

```
CS0 = @pointer(2) ;
B = @pointer(3);
long_parc = @pointer(4);
pente = @pointer(5);
dRaies = @pointer(6);
larg_parc = @pointer(7);

largeurBas = @pointer(8);
largeurHaut = @pointer(9);
Profondeur = @pointer(10);
rugosite = @pointer(11);
doseVoulue = @pointer(12) ;!80;
nraieMin = @pointer(13);
TIRR_MAX = @pointer(14);

!renvoi des donnees;
@pointer(15) = DUREE;
@pointer(16) = NRAIES;
@pointer(17) = DINF1;
@pointer(18) = DINF2;
@pointer(19) = DINF3;
@pointer(20) = DINF4;
@pointer(21) = DINF5;
@pointer(22) = RN;
@pointer(23) = DI;
@pointer(24) = DN;
@pointer(25) = DB;
@pointer(26) = TIRR;
@pointer(27) = @STATUS();

END DATA
END
```

Annexe F

Commodités agricoles et coefficients associés

	Maïs	Sorgho	Blé	Orge	Brocoli	P.Chiche
1980	4.8	3.6	3.79	3.94	3.42	5.98
1981	6.23	3.91	4.56	4.97	5.39	5.57
1982	9.06	7.74	6.82	6.64	6.97	7.37
1983	19.1	12.96	13.96	15.82	12.7	23.61
1984	32.24	27.83	24.98	26.41	24.7	
1985	52.65	38.81	37.18	43.16	39.52	
1986	99.64	70.29	60.35	72.19	81.58	102.12
1987	186.02	151.85	114.62	151.01	193.14	205.5
1988	406.57	276.15	330.28	327.67	427.4	442.44
1989	486.1	294.94	393.66	429.87	639.58	730.26
1990	615.19	334.92	548.57	524.15	761.29	613.14
1991	720.07	445	638	633	780.6	817.4
1992	754.53	465.16	609.7	670.65	804.04	824.37
1993	727	443.3	607.26	701	847.76	826.66
1994	602	402	598	700	1251.89	821.67
1995	1110	1003	844	745	1447.29	982.82
1996	1205.38	981.04	1901.03	1521.89	1668.87	1304.65
1997	1211.73	1103.98	1243.19	1367.59	1898.73	2890.96
1998	1383.65	1037.36	1371.4	1340.77	2096.2	2364.89
1999	1333	1007	1368.05	1491	2320	2719
2000	1371	1108	1451.6	1445.6	2183	1966

TAB. F.1 – Prix des commodités agricoles (source : CIMMYT, 2002)

Sources : Données de 1980 à 1998 (CIMMYT, 2002) Données de 1998 à 2000 (Secretaria de Agricultura Ganaderia Desarrollo rural Pesca y Alimentación,

2001).

	Déflateur (1994 = 100)	Maïs	Sorgho	Blé	Orge	Brocoli R	P.Chiche
1980	0.3994	1201.8	901.4	948.9	986.5	856.3	1497.2
1981	0.5109	1219.4	765.3	892.5	972.8	1055	1090.2
1982	0.8119	1115.9	953.3	840	817.8	858.5	907.7
1983	1.6391	1165.3	790.7	851.7	965.2	774.8	1440.4
1984	2.7119	1188.8	1026.2	921.1	973.9	910.8	1387
1985	4.278	1230.7	907.2	869.1	1008.9	923.8	1334
1986	7.967	1250.7	882.3	757.5	906.1	1024	1281.8
1987	18.4696	1007.2	822.2	620.6	817.6	1045.7	1112.6
1988	39.555	1027.9	698.1	835	828.4	1080.5	1118.5
1989	47.4691	1024	621.3	829.3	905.6	1347.4	1538.4
1990	60.1203	1023.3	557.1	912.5	871.8	1266.3	1019.9
1991	73.7451	976.4	603.4	865.1	858.4	1058.5	1108.4
1992	85.1814	885.8	546.1	715.8	787.3	943.9	967.8
1993	93.4878	777.6	474.2	649.6	749.8	906.8	884.2
1994	100	602	402	598	700	1251.9	821.7
1995	134.9994	822.2	743	625.2	551.9	1072.1	728
1996	181.4083	664.5	540.8	1047.9	838.9	920	719.2
1997	218.8271	553.7	504.5	568.1	625	867.7	1321.1
1998	253.6842	545.4	408.9	540.6	528.5	826.3	932.2
1999	295.7575	450.7	340.5	462.6	504.1	784.4	919.3
2000	323.8291	423.4	342.2	448.3	446.4	674.1	607.1

TAB. F.2 – Prix des commodités agricoles déflatés

Commodités agricoles

	Blé	Orge	Mais	Sorgho	P.Chiche	Brocoli
1	695.2	579	612.3	350.5	696.1	1158.4
2	587.3	570	537.7	358.4	785.3	1085.7
3	428.1	510.2	371.5	233.5	473.1	1683.6
4	502.6	422.8	422.1	289	227	510
5	695.6	575.5	482.4	131.2	739.2	1399.1
6	774.9	526	482.5	254.3	408.2	399
7	437.1	441.1	398.6	286.8	865.5	570.4
8	265.8	421.2	487.9	512.1	1078.7	901.8
9	683.2	596.6	459	335.1	755.7	1467.8
10	283.5	412.4	300.9	196.1	683.6	738.1
11	709.7	680.7	692.7	427.5	637	1464.9
12	572.5	558.9	617	465.7	717.4	1535.8
13	521	513.5	524.7	368.6	764	1109.2
14	781.2	618.8	411.6	185.6	591.3	740.1
15	473.4	546.8	422.5	391.4	950.3	1304.4
16	515.4	520.9	439	182.4	974.2	1150.3
17	379.2	471.5	307.2	168	801.8	904.5
18	601.7	510.5	452.4	308.7	788.4	1127.4
19	578.4	598.6	419.2	240.8	1209.5	1020.5
20	656	527.1	429.5	323.2	500.4	761.8
21	707	666.4	558.3	306.9	811.2	905.3
22	478.2	505.5	340.4	349.9	1186.8	961.6
23	594.2	579.6	504.1	558.8	789.3	785.1
24	548	527.8	433.4	449.5	915.4	947.9
25	523.8	528.6	415.8	277.6	739.8	982.8
26	606.5	649.9	515.5	204.6	1172.8	1105.3
27	587.2	551.9	372.9	99.5	766.4	1150.4
28	420.5	463.8	281.1	261	721.3	423.4
29	533.7	494.1	426.1	395.7	650.7	935.6
30	630.3	534	428.7	540.3	647.1	1217.7

TAB. F.3 – Prix des commodités utilisées par le modèle

	Blé	Orge	Mais	Sorgho	Brocoli	P.Chiche
Blé	1					
Orge	0.77	1				
Mais	0.54	0.62	1			
Sorgho	-0.03	0.02	0.43	1		
Brocoli	0.14	0.44	0.4	0.11	1	
P.Chiche	-0.26	0.16	-0.03	0.05	0.16	1

TAB. F.4 – Coefficients de corrélations entre les variables prix générées

Nom	culture	technique	Option d'irrigation
Mais_SD_R100	Mais	SD	R100
Mais_SD_R80	Mais	SD	R80
Mais_SD_DN48	Mais	SD	DN48
Mais_SD_DN24	Mais	SD	DN24
Mais_SD_N	Mais	SD	N
Mais_TRAD_R100	Mais	TRAD	R100
Mais_TRAD_R80	Mais	TRAD	R80
Mais_TRAD_DN48	Mais	TRAD	DN48
Mais_TRAD_DN24	Mais	TRAD	DN24
Mais_TRAD_N	Mais	TRAD	N
Sorgo_SD_R100	Sorgo	SD	R100
Sorgo_SD_R80	Sorgo	SD	R80
Sorgo_SD_DN48	Sorgo	SD	DN48
Sorgo_SD_DN24	Sorgo	SD	DN24
Sorgo_SD_N	Sorgo	SD	N
Sorgo_TRAD_R100	Sorgo	TRAD	R100
Sorgo_TRAD_R80	Sorgo	TRAD	R80
Sorgo_TRAD_DN48	Sorgo	TRAD	DN48
Sorgo_TRAD_DN24	Sorgo	TRAD	DN24
Sorgo_TRAD_N	Sorgo	TRAD	N
RienE_TRAD_N	RienE	TRAD	N

TAB. F.5 – Différentes cultures d'été utilisées dans le modèle

Nom	culture	technique	Option d'irrigation
Ble_SD_R100	Ble	SD	R100
Ble_SD_R80	Ble	SD	R80
Ble_SD_DN48	Ble	SD	DN48
Ble_SD_DN24	Ble	SD	DN24
Ble_TRAD_R100	Ble	TRAD	R100
Ble_TRAD_R80	Ble	TRAD	R80
Ble_TRAD_DN48	Ble	TRAD	DN48
Ble_TRAD_DN24	Ble	TRAD	DN24
Orge_SD_R100	Orge	SD	R100
Orge_SD_R80	Orge	SD	R80
Orge_SD_DN48	Orge	SD	DN48
Orge_SD_DN24	Orge	SD	DN24
Orge_TRAD_R100	Orge	TRAD	R100
Orge_TRAD_R80	Orge	TRAD	R80
Orge_TRAD_DN48	Orge	TRAD	DN48
Orge_TRAD_DN24	Orge	TRAD	DN24
PoisChiche_TRAD_N	PoisChiche	TRAD	N
Brocoli_TRAD_R100	Brocoli	TRAD	R100
Brocoli_TRAD_DN48	Brocoli	TRAD	DN48
RienH_TRAD_N	RienH	TRAD	N

TAB. F.6 – Différentes cultures d'hiver utilisées dans le modèle

Nom
Ble_SD_R100_ Mais_SD_R100
Ble_SD_R100_ Mais_SD_R80
Ble_SD_R100_ Mais_SD_DN48
Ble_SD_R100_ Mais_SD_DN24
Ble_SD_R100_ Mais_SD_N
Ble_SD_R100_ Mais_TRAD_R100
Ble_SD_R100_ Mais_TRAD_R80
Ble_SD_R100_ Mais_TRAD_DN48
Ble_SD_R100_ Mais_TRAD_DN24
Ble_SD_R100_ Mais_TRAD_N
Ble_SD_R100_ Sorgo_SD_R100
Ble_SD_R100_ Sorgo_SD_R80
Ble_SD_R100_ Sorgo_SD_DN48
Ble_SD_R100_ Sorgo_SD_DN24

TAB. F.7 – Exemples de cultures composites

Annexe G

Génération de variables aléatoires corrélées

La notion de corrélation est liée à celle de propagation d'erreur. Des nombres aléatoires corrélés émanent de nombres aléatoires non corrélés après propagation d'erreur. On cherche donc la matrice A qui transforme la matrice unité en la matrice d'erreur recherchée quand on propage l'erreur : . Cela revient en fait à effectuer une décomposition de Cholesky. Nous attachons ici l'algorithme que nous avons développé pour la génération de séries de prix corrélés selon une matrice de corrélation. L'algorithme est développé en langage SAS-IML (SAS Institute, 1990) :

```
%macro unif;
/* generation des variables uniformes */

%do iter = 1 %to &nd %by 1;
C&iter = ranuni(12344);
%end;
%mend;

%macro creerLesVar;
%let suff = A;
%let suff2 = AC;
%do iter = 1 %to &nd %by 1;
%let lesVar = &lesVar C&iter;
%end;
%do iter = 1 %to &nd2 %by 1;
%let lesVarP = &lesVarP P&iter;
%let lesVarA = &lesVarA C&iter&suff;
%let lesVarAC = &lesVarAC C&iter&suff2;
```



```

%end;
%mend;

/* Module de generation des prix des denrees agricoles */
/* Lancer au prealable les macros generation */

/* Etablissement des constantes et variables */
%let no = 30; /*taille des echantillons*/
%let nd = 6; /*no de distribution */
%let nd2 = 11; /*no de distribution */
%let lesVar = ;
%let lesVarA = ;
%let lesVarAC = ;
%let lesVarP = ;
%creerLesVar;
%put &lesVarAC;

data prixU;
/* Generation des distributions uniformes */
do i = 1 to &no;
%unif;
output;
end;
run;
/* Importation des coefficients de correlation */
proc import datafile = 'corr.txt'
out = paraCorr DBMS = TAB REPLACE; run;

/* verification de la symetrie de la matrice */
proc iml;

USE paraCorr;
read all into RT; RT2 = T(RT);
if RT ^= RT2 then print "ee";
U = root(RT); *decomposition de Cholesky ;

USE prixU var {&lesVar};
read all into X; *importation des donnees dans une matrice;
NEWX = X*U; *propagation de l'erreur (post-mult par U);

CREATE work.prixUC var {&lesVar};
append from NEWX; SHOW contents;
CLOSE work.prixUC; *creation du nouveau set de donnees;

```

```

QUIT;

data prixUC2; set prixUC;
P1 = C1; P2 = C2; P3 = C3; P4 = C4;
P5 = C5; P6 = 0; P7 = C6; P8 = C6; P9 = C4 ; P10 = C3; P11 = 0;
drop &lesVar; run;

/* Importer les parametres des variables normales */
proc import datafile = 'lesParaPrix.txt'
out = paraN DBMS = DLM REPLACE; delimiter = ','; run;

/* Creer les variables normales */
proc iml;
start norm(var, moy, devSta);
varN = moy + (var * devSta);
return (varN);
finish;

USE paraN ;
read all into XT;

USE prixUc2 var {&lesVarP};
read all into RT;
print RT;

one = J(&no, &nd2 ,0);
do i = 1 to &no by 1;
do j = 1 to &nd2 by 1;
one[i,j] = norm(RT[i,j], XT[j,2], XT[j,3]);
end;
end;
print one;

CREATE C2ac var {&lesvarAC };
append from one;

CLOSE C2AC;
quit;
/* Rassembler les deux fichiers */
data prixFin; set prixUC ; set C2AC; run;
/* Eliminer le fichier intermediaire */
*proc datasets; *delete C2AC; run;

```

```
data prixfn; set prixfn;
keep &lesvarac; run;

proc corr data = prixFn;
var &lesVarAC; run;

/* mise en place sur une colonne */
proc iml;

USE prixfn ;
read all into YY;
two = J(&no * &nd2 ,3,0);
long= nrow(two);
print long;
x = 1;
do lc = 1 to &nd2 by 1;
do la = 1 to &no by 1;
two[x,1] = lc;
two[x,2] = la;
two[x,3] = yy[la, lc];
x = x + 1;
end;
end;

CREATE prix3Col var {cultureID anneeID prix} ;
append from two;
CLOSE RDT3Col;
quit;

/* Exportation des donnees dans un fichier texte */
proc export data = prix3Col outfile = "prix3Col.txt" DBMS = dlm
replace;
delimiter = ',';
run;
```


VU et PERMIS D'IMPRIMER

Montpellier, le

La Présidente de l'Université de Montpellier I

Dominique DEVILLE de PERIERE

RESUME : Un nombre croissant d'aquifères ont un déséquilibre marqué entre recharge et demande provoquant un épuisement progressif de la ressource. Ce phénomène est marqué dans les zones semi-arides où une agriculture irriguée intensive s'est développée. La majorité des prélèvements sur ces nappes est imputable à l'agriculture. L'objectif est donc de réduire la consommation brute globale des systèmes de production agricoles au nom de la durabilité et de l'allocation entre les secteurs. Ce travail étudie l'impact des instruments de gestion de la demande en eau sur des petits périmètres irrigués collectifs, ici appelés puits collectifs, d'une région d'agriculture intensive du centre du Mexique. Plusieurs instruments sont considérés : économiques (tarification, quotas, subventions) d'une part, offre technologique d'autre part.

Par ailleurs, une part importante est consacrée à l'impact de la configuration institutionnelle (règles collectives) sur les résultats de ces instruments. A l'aide de la programmation mathématique, nous modélisons les décisions individuelles des producteurs en situation d'interactions stratégiques au sein des puits collectifs par une formulation type problème de complémentarité mixte. Cette formulation nous permet de représenter l'optimisation simultanée d'agents en interactions (équilibre de Nash). Nous confrontons les résultats de ce modèle avec ceux d'un puits où le comportement des producteurs est coopératif, i.e. maximisant une fonction d'utilité unique du groupe. Ceci nous permet d'apporter une perspective quantitative au débat sur les rôles respectifs des incitations économiques et des institutions dans la lutte contre la dégradation des ressources naturelles. Notre étude montre qu'au régime de tarification actuel la consommation globale des puits collectifs est peu différenciée entre les modes coopératifs et non-coopératifs. Par contre l'allocation de l'eau entre les différents membres varie entre ces deux modes. Tout travail institutionnel est donc susceptible d'induire une ré-allocation plutôt qu'une réelle diminution du niveau global de consommation, réduisant l'intérêt que pourront porter les décideurs politiques. Cependant, avec un scénario d'augmentation du prix de l'électricité, les écarts de consommations croissants entre les deux équilibres justifient un travail d'accompagnement institutionnel d'une réforme tarifaire.

Par ailleurs, l'étude de la tarification uniforme avec remise fixe réhabilite l'outil tarifaire souvent perçu comme nécessaire mais politiquement difficile à mettre en place du fait de l'inélasticité de la consommation des systèmes de production au coût de l'eau. Ce type de tarification évite de ponctionner le secteur agricole dans son ensemble, mais engendre des transferts entre les différents types d'utilisateurs.

Au final, ce travail montre que si aucun des instruments pris isolément ne permet d'apporter une solution en termes de diminution de la demande en eau agricole, une combinaison des instruments tarifaires et institutionnels et du changement technique permettrait d'apporter une solution cohérente.

TITLE : Impact of policies aiming at reducing gross water consumption of agricultural irrigated systems : the case of wells managed by groups of farmers in Mexico.

ABSTRACT : An increasing number of regions have unsustainable groundwater balance due to overdraft. This is most evident in semi-arid areas where intensive irrigated agriculture takes place. In general, agriculture is taking the larger share of water extractions. Therefore, the main objective of policy-makers is to induce a reduction of water use by the agricultural sector to achieve sustainability in aquifer management and also to reallocate water to other sectors.

This work studies the impact of water demand-management strategies on small-scale groundwater irrigated systems that are managed by groups of farmers in the *Bajío Guanajuatense*, centre of Mexico, where intensive irrigated agriculture predominates. Several strategies are considered : economic tools (electricity pricing, electricity quotas, subsidies) on one side, technological change with conservation tillage on the other side. We also paid attention to the impact of institutional settings (collective rules) on the effectiveness of these instruments.

Farmers decisions, interacting strategically with other members, are represented by mathematical programming models with a Mixed Complementarity Problem (MCP) structure. The simultaneous optimizations of utility functions of the different interacting members, considering their technical constraints, result in a non-cooperative equilibrium. Non-cooperative and cooperative equilibrium, whereby all farmers would contribute to a unique and additive utility function, are compared. This comparison brings a quantitative perspective to the debate on the respective role of economic incentives versus organizations in addressing natural resources degradation.

Results shows that, at current electricity price regime, water consumption by cooperative and non-cooperative wells are not significantly different. However, cooperation does have an effect on water allocation between members. Therefore, institutional change within groups is more likely to have an effect on water allocation than global water consumption, thereby reducing its attractiveness for decision-makers. However, when electricity prices are increased, difference in consumption between cooperative and non-cooperative mode are becoming important. In that context, accompanying changes of institutions will then become necessary and useful.

In addition, as water pricing is often considered necessary but politically difficult to implement given consumption inelasticity, we studied the potential of a new rate structure, the uniform price with rebate. We show that this tariff structure allows sending a strong price signal that is effective at changing water consumption. But, with the help of the rebate, it also avoids puncturing the agricultural sector as a whole, but generates transfers between the various types of users.

Finally, this work shows that if none of these instruments alone makes it possible to reduce agricultural water demand without affecting farmers seriously, a combination of price level and structure change, as well as technical and institutional changes would bring a coherent solution.

DISCIPLINE : Sciences Economiques

MOTS-CLES : Propriété collective, Demande en eau, Equilibre de Nash, Tarification de l'eau, Politiques agricoles, Economie de la production